



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE GRADO

TÍTULO DEL TFG: Infraestructuras Digitales para la Movilidad Urbana Conectada. Sistemas de Comunicaciones, sensores y gestión de los datos 3D para la movilidad autónoma.

TITULACIÓN: Grau en Enginyeria de Sistemes de Telecomunicació

AUTOR: David Hernández Utreras / Francesc Xavier Pérez Canela

DIRECTOR: Lluís Jofre Roca

FECHA: 30 de Enero de 2020

Título: Infraestructuras Digitales para la Movilidad Urbana Conectada. Sistemas de Comunicaciones, sensores y gestión de los datos 3D para la movilidad autónoma.

Autor: David Hernández Utreras / Francesc Xavier Pérez Canela

Director: Lluís Jofre Roca

Data: 30 de Enero de 2020

Resumen

El proyecto consiste en el estudio de las posibles nuevas tecnologías para los vehículos y las infraestructuras en el ámbito de la movilidad urbana.

Se ha estudiado el desarrollo durante los años próximos, haciendo énfasis en la evolución de las infraestructuras, junto con la evolución de los vehículos y de la tecnología.

Se marcan tres puntos de estudio: corto, medio y largo plazo para analizar en qué punto de desarrollo se encontrarán las ciudades y el vehículo. Estos tres puntos son los años 2020, 2025 y 2030. De esta manera, se pretende observar el cambio y la tendencia hacia los vehículos autónomos, sus problemas, su implementación y evolución.

El proyecto está focalizado en dos fuentes de estudio principales:

- Infraestructuras para la movilidad.
- Gestión de los datos generados.

A parte de lo anteriormente nombrado, se ha realizado un análisis de algunos de los prototipos de vehículos autónomos actualmente implementados y su funcionamiento en distintos países.

Se ha realizado un estudio junto con una simulación del posicionamiento de estaciones base 5G en las diferentes frecuencias de trabajo para una trama urbana.

Para finalizar se ha analizado los diferentes tipos de mensajes de comunicaciones que se verán involucrados en la implementación del vehículo autónomo.

Title: Digital infrastructure for the urban Connected mobility. Communication systems, sensing and 3D data management for autonomous mobility.

Author: David Hernández Utreras / Francesc Xavier Pérez Canela

Director: Lluís Jofre Roca

Date: January 30 of 2020

Overview

This project consists on the study of possible new technologies in the field of urban mobility. The development has been studied over the next years, emphasizing the evolution of infrastructure, along with the evolution of vehicles and technology.

There are three key points of study: short, medium and long term to analyze in which point of development the cities and the vehicle will be. These three points are the years 2020, 2025 and 2030. In this way, it is pretend to observe the changes and the trend towards autonomous vehicle, their problems, implementation and evolution.

The project is focused on two main sources of study:

- Infrastructure for mobility.
- Management of the generated data.

Apart from what was said before, an analysis of some of the prototypes of autonomous vehicles already implemented and their functionality in different countries has been carried out.

It has been done an analysis together with a simulation of positioning of 5G base station in the two different 5G range of operation in an urban plot.

For ending, has been analyzed the different kinds of communication messages involved in the autonomous vehicle implementation

Queremos dar las gracias a nuestro tutor Lluís Jofre por toda su ayuda,
a nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional
y a toda la gente que nos ha apoyado.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
2. PROTOTIPOS DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS	9
2.1 Niveles de autonomia de los vehículos.	9
2.2 Prototipos de vehículos autónomos para uso privado	11
2.2.1 Prototipos de vehículos autónomos con nivel de autonomía 4.....	11
2.2.2 Prototipos de vehículos autónomos con nivel de autonomía 5.....	13
2.3 Prototipos de vehículos autónomos para el servicio de transporte publico	14
2.3.1 Prototipo de vehículo autónomo equivalente a los autobuses.....	14
2.3.2 Prototipo de vehículo autónomo equivalente al taxi.....	15
2.3.3 Prototipo de vehículo autónomo equivalente al metro	16
3. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN APLICADAS A LA MOVILIDAD AUTÓNOMA	17
3.1 Tecnologías de Comunicación Actuales	17
3.1.1 Tecnologías Cableadas.....	18
3.1.2 Tecnologías Inalámbricas.....	19
3.1.2.1 Tecnologías inalámbricas basadas en WiFi.....	19
3.1.2.2 Tecnologías inalámbricas basadas en redes celulares.	19
3.2 Comunicaciones inalámbricas de nueva generación.....	21
3.2.1 Tecnología inalámbrica 5G.....	21
3.2.2 Tecnología inalámbrica ITS-G5.....	22
3.2.3 Comparativa entre 5G y ITS-G5.....	23
3.2.4 Convivencia entre 5G y ITS-G5.....	23
4. ESTUDIO DE LA CAPA ELECTRÓNICA ADICIONAL SOBRE LAS INFRAESTRUCTURAS Y LOS VEHICULOS PARA LA MOVILIDAD AUTONOMA.....	24
4.1 Evolución temporal de la capa electrónica para la movilidad autónoma.....	24
4.1.1 Evolución temporal de la capa electrónica sobre la infraestructura urbana	24
4.1.2 Evolución temporal de la capa electrónica sobre los vehículos autónomos.....	25
4.2 Impactos socioeconómicos del vehículo autónomo	28
4.2.1 Impacto económico sobre el entorno urbano	28
4.2.2 Impacto medioambiental	29
4.2.3 Impacto sobre la seguridad	31
5. CALCULO DEL DESPLIEGUE DE ESTACIONES BASE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA COBERTURA 5G PARA LA MOVILIDAD URBANA CONECTADA	34
5.1 Simulación numérica de los niveles de potencia sobre una trama urbana	34
5.1.1 Herramienta de cálculo de cobertura	34
5.1.2 Creación de la base de datos de la trama urbana seleccionada	35
5.1.3 Configuración de los parámetros de las estaciones base.....	39

5.2	Diseño de la red de estaciones base en la trama urbana de la Sagrada Familia	44
5.2.1	Estudio de la cobertura sobre una trama urbana de una primera estación base	44
5.2.2	Proceso secuencial de la cobertura conjunta a frecuencia sub 6GHz.....	47
5.2.3	Proceso secuencial de la cobertura conjunta a frecuencia de 26GHz.....	50
5.2.4	Conclusiones iniciales	54
6.	DATOS 3D PARA LA MOVILIDAD AUTÓNOMA	55
6.1	Necesidad de datos 3D para la movilidad autónoma.	55
6.2	Volumen de datos 3D para la movilidad autónoma.	57
6.2.1	Volumen de datos para un único vehículo autónomo	57
6.2.2	Extrapolación al tráfico habitual en una trama urbana concurrida	57
6.3	Gestión del volumen de datos 3D para la movilidad autónoma. “Edge Computing”.	59
6.3.1	Definición del “Edge Computing”.....	59
6.3.2	Estructura del “Edge Computing”.	60
6.3.3	Ejemplo de la aplicación de “Edge Computing”	61
7.	COMUNICACIONES PARA LA MOVILIDAD AUTONOMA.....	62
7.1	Tipos de datos utilizados en los vehículos autónomos.	62
7.1.1	Datos 3D para la movilidad autónoma	62
7.1.2	Datos para la comunicación del vehículo autónomo y su entorno.....	62
7.1.2.1	Comunicación entre el vehículo autónomo y los pasajeros.....	64
7.1.2.2	Comunicación entre los vehículos y la infraestructura (V2I/I2V)	64
7.1.2.3	Comunicación entre vehículos (V2V).....	65
7.1.2.4	Comunicación del vehículo en casos de emergencia a los peatones (V2P)	65
7.1.3	Mensajes para el entretenimiento.	66
7.2	Volumen de datos por segundo y ancho de banda necesarios para los vehículos autónomos.....	66
7.2.1	Volumen de datos para un único vehículo autónomo	67
7.2.2	Extrapolación para el tráfico habitual en una trama urbana concurrida.....	68
7.2.3	Ancho de banda necesario para el vehículo autónomo	68
8.	CONCLUSIONES	70
9.	REFERENCIAS	72
10.	ANEXO	79

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la evolución tecnología, el medio ambiente y la seguridad, son tres de las mayores preocupaciones del planeta, principalmente en los países desarrollados [1]. El vehículo autónomo representa un avance en los tres puntos anteriores frente al vehículo tradicional.

Una vez identificadas estas tres preocupaciones y sabiendo que el vehículo autónomo es un avance en estos aspectos, se encuentran dos focos principales de estudio para la implementación de los vehículos autónomos:

- ¿Qué sistemas de comunicación y sensorización son necesarios para la implementación del vehículo autónomo?
- ¿Cómo se gestionará la cantidad de datos generados?

En la actualidad, las comunicaciones se realizan a través de diferentes tecnologías (WiFi, Fibra Óptica, Redes móviles 3G/4G, Enlaces Vía Radio, Conexiones Vía Satélites, etc.), todas ellas son útiles en sus ámbitos de implementación, pero ninguna de ellas cumple todos los requisitos necesarios para su uso en la implementación del vehículo autónomo [2].

Dos de los requisitos que las tecnologías nombradas anteriormente no cumplen y son necesarias para la implementación del vehículo autónomo son un gran ancho de banda y una muy baja latencia. Una tecnología que cumple estos requisitos es el 5G.

También se han estudiado el impacto socioeconómico que significará la implementación del vehículo autónomo tanto en el ámbito medioambiental (contaminación) como en el campo de la seguridad viaria [3].

Además, se han analizado algunos de los proyectos de vehículos autónomos en distintos países y sus resultados.

También se ha realizado un cálculo del despliegue de estaciones base con el objetivo de la optimización de la cobertura 5G para la movilidad urbana.

Con la implementación del vehículo autónomo se generará una gran cantidad de datos, que será necesario gestionar y distribuir al resto de vehículos y a la infraestructura. Debido a de esto, se ha analizado el volumen de datos, los posibles métodos de gestión y sus posibles limitaciones.

Para finalizar, se ha realizado un estudio de los diferentes tipos de protocolos de comunicación y los mensajes enviados entre los vehículos y el resto de dispositivos que conformarán la red.

2. PROTOTIPOS DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS

En primer lugar, se estudiarán los niveles de autonomía que pueden tener los vehículos autónomos. Seguidamente, se analizarán tipos de prototipos de vehículos autónomos que se encuentran actualmente en el mercado. En un primer caso, se analizarán los diferentes vehículos autónomos destinados al uso privado y finalmente se estudiarán diferentes alternativas de prototipos para los vehículos autónomos destinados al transporte público.

2.1 Niveles de autonomía de los vehículos.

El primer organismo que realizó una clasificación de los niveles de autonomía de los vehículos fue la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration), una Agencia Federal que se encarga de la seguridad de los vehículos y las carreteras de los Estados Unidos. En 2013 se clasificaron según la siguiente escala [4]. En la Figura 1 se observa un resumen de lo que se explica a continuación:

- Autonomía de nivel 0, vehículos analógicos: Sin automatización de la conducción. El conductor es el encargado de realizar todas las acciones para circular con el vehículo.
- Autonomía de nivel 1, vehículos con conducción asistida: Se trata de vehículos que tienen dispositivos de asistencia a la conducción. Algunas de estas ayudas son: frenada automática de asistencia, control de velocidad de cruce, alerta de salida de carril involuntaria o avisar de la presencia de otros vehículos en el ángulo ciego del retrovisor. Estas ayudas siempre son pasivas y solamente pueden actuar de una en una. Son ayudas, pero siempre dependen de la actuación del conductor.
- Autonomía de nivel 2, automatización parcial: Se trata de ayudas parecidas a las mencionadas anteriormente en el nivel de autonomía 1 pero con la diferencia de que son capaces de memorizar determinadas acciones que va haciendo el conductor. Algunas de dichas ayudas son sistema de aparcamiento automático, sistema de mantenimiento en el centro del carril o control de velocidad adaptativo. Estas ayudas son activas, no son avisos, se trata de acciones correctivas. Aun así, el conductor sigue siendo el responsable del vehículo en todo momento y debe llevar las manos en el volante.
- Autonomía de nivel 3, automatización condicional de la conducción: Se trata de un punto y aparte respecto de los anteriores niveles. El conductor toma la decisión de si el sistema de conducción autónoma del vehículo tome el control y realice todas las funciones propias de la conducción, aunque con algunas restricciones. En este caso, el automóvil continúa teniendo volante y pedales ya que el conductor es

necesario que esté atento ya que puede ser necesaria su intervención en el supuesto de que se produzca una situación de riesgo inminente. Otra de las limitaciones que existen en este nivel de autonomía es que en caso que el vehículo tenga el control, este no podrá superar en ningún caso los 60 Km/h.

- Autonomía de nivel 4, alta automatización de la conducción: En este nivel de autonomía al conductor ya se le puede tratar en gran parte del trayecto como pasajero. El vehículo tiene la capacidad de circular de manera continuada sin la necesidad de que el pasajero ubicado en la posición destinada al conductor realice ninguna acción en largos periodos de tiempo. Estos vehículos mantienen la configuración actual de los vehículos en lo referente a las ubicaciones de los pasajeros ya que el conductor cada cierto tiempo debe actuar sobre el vehículo. En caso de que el conductor no realice ninguna acción en un periodo muy prolongado de tiempo, el vehículo se detendrá en un lugar que considere seguro.
- Autonomía de nivel 5, automatización total de la conducción: esta es la última fase para la implementación de los vehículos autónomos. En este caso, los vehículos reúnen todas las capacidades para circular por todos los entornos y condiciones en que un humano sería capaz de circular. Por lo tanto, es viable la retirada de todos aquellos mecanismos destinados a la conducción del vehículo por parte de un humano, como pedales y volante. Este es el nivel de autonomía máxima.

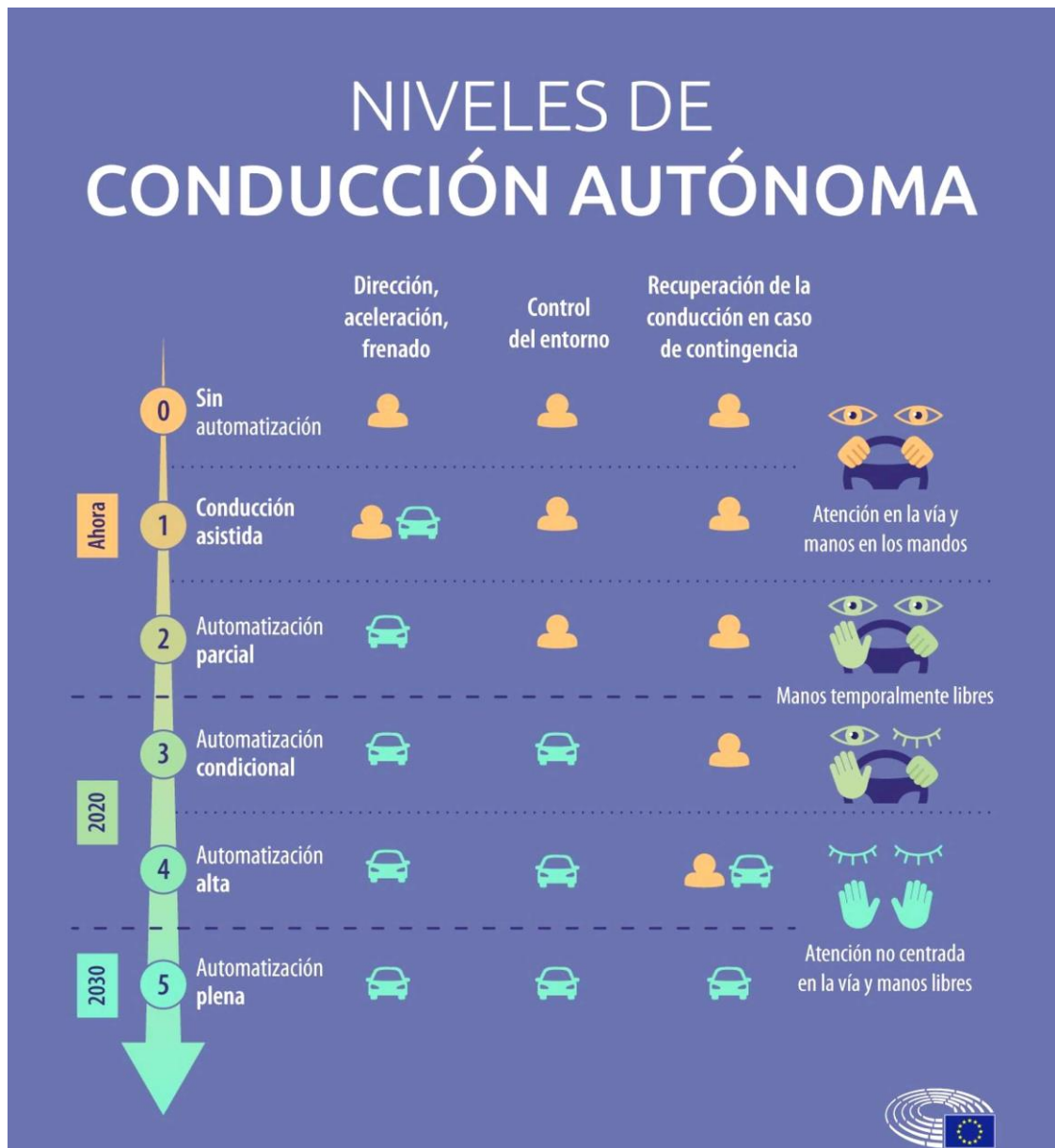


Figura 1: Niveles de autonomía [5]

2.2 Prototipos de vehículos autónomos para uso privado

2.2.1 Prototipos de vehículos autónomos con nivel de autonomía 4

En el ámbito de transporte privado existen muchos prototipos distintos. Todas las grandes concesionarias están fabricando sus propios prototipos y se espera que empiecen a presentarlos en 2022.

Un ejemplo de vehículo autónomo privado es el que ha presentado Toyota recientemente y que se puede observar en la Figura 2. El modelo denominado LQ tiene un nivel de autonomía 4, es totalmente eléctrico, puede alcanzar

velocidades de hasta 120 Km/h y recorrer 300 Km sin necesidad de parar a recargar [6].



Figura 2: Prototipo Toyota.

Otro de los fabricantes que está apostando fuerte por la conducción autónoma es Tesla. La compañía Norte Americana ofrece en todos sus vehículos un nivel de autonomía 4 y completamente eléctricos. Esto requiere que los conductores deban estar pendientes de la conducción, pero no es necesario que toquen el volante o los pedales para que el vehículo autónomo pueda circular correctamente [7].

Debido a restricciones de la normativa europea, la tecnología “Autopilot” está por ahora, únicamente disponible en los Estados Unidos pero se espera que próximamente esté disponible en la Unión Europea.

El sistema “Autopilot” se basa únicamente en la sensorización del propio vehículo y por lo tanto no necesita de una infraestructura externa especializada en la conducción autónoma. El hecho que solo disponga de una fuente de información es uno de los factores que hacen que sea más difícil para él cumplir los requisitos impuestos por la legislación europea. En la Figura 3 se observa el panel de un vehículo Tesla con la función Autopilot y las imágenes captadas por parte de sus cámaras.



Figura 3: Tesla Autopilot y visión de su cámara.

2.2.2 Prototipos de vehículos autónomos con nivel de autonomía 5.

Otro ejemplo de vehículo privado con un diseño particular es el que presenta Volvo. El prototipo se llama 360c y es totalmente eléctrico. Aunque no se conocen aún sus características básicas destaca por un diseño innovador con un habitáculo en forma de habitación como se observa en la Figura 4 [8].



Figura 4: Prototipo Volvo

2.3 Prototipos de vehículos autónomos para el servicio de transporte público

2.3.1 Prototipo de vehículo autónomo equivalente a los autobuses

Un ejemplo de la implementación del vehículo autónomo para el transporte público se encuentra en Suecia. Se trata de una lanzadera autónoma como se puede ver en la Figura 5, en la ciudad de Estocolmo, en un área de acceso restringido al vehículo privado y con varias sedes de empresas tecnológicas como IBM, Sony o Ericsson. Para promover su uso, es de acceso gratuito y tiene una media de 200 pasajeros al día [9]. Se trata de un vehículo 100% eléctrico que llega a alcanzar velocidades de 20 km/h. Puede llevar hasta 11 pasajeros de manera simultánea y sus baterías le ofrecen una autonomía de hasta 10 horas. Todas sus comunicaciones con las infraestructuras y otras lanzaderas las realiza mediante 5G.



Figura 5: Prototipo Lanzadera Suecia



Figura 6: Prototipo autobús futuro Suecia

Este prototipo ha tenido un gran éxito y ya se está trabajando para que durante el 2020 un prototipo mejorado pueda circular por toda la ciudad. Las principales mejoras de este prototipo serán la velocidad que pueda alcanzar, la capacidad de pasajeros y alargar la autonomía del vehículo. Un ejemplo de este prototipo mejorado se puede ver en la Figura 6. Los gobiernos de otros países y comunidades autónomas como los Países Bajos o Catalunya también han generado ya sus propios prototipos de autobuses autónomos [10] como se visualiza en las Figuras 7 y 8.



Figura 7: Prototipo autobús Holanda



Figura 8: Prototipo autobús Catalunya

2.3.2 Prototipo de vehículo autónomo equivalente al taxi

Actualmente ya existen taxis autónomos ofrecidos por la compañía Waymo, que se encuentra en los Estados Unidos. Algunos de los clientes de estos taxis se quejan de "rutas ineficientes", "frenado excesivo" o "conducción inestable" de estos taxis autónomos. Estos vehículos funcionan exactamente igual que el Autopilot de Tesla previamente explicado. Este no necesita de conectividad con la red, funcionan mediante sensorización propia como se puede observar en la Figura 9 y se solicitan mediante una aplicación móvil [11].

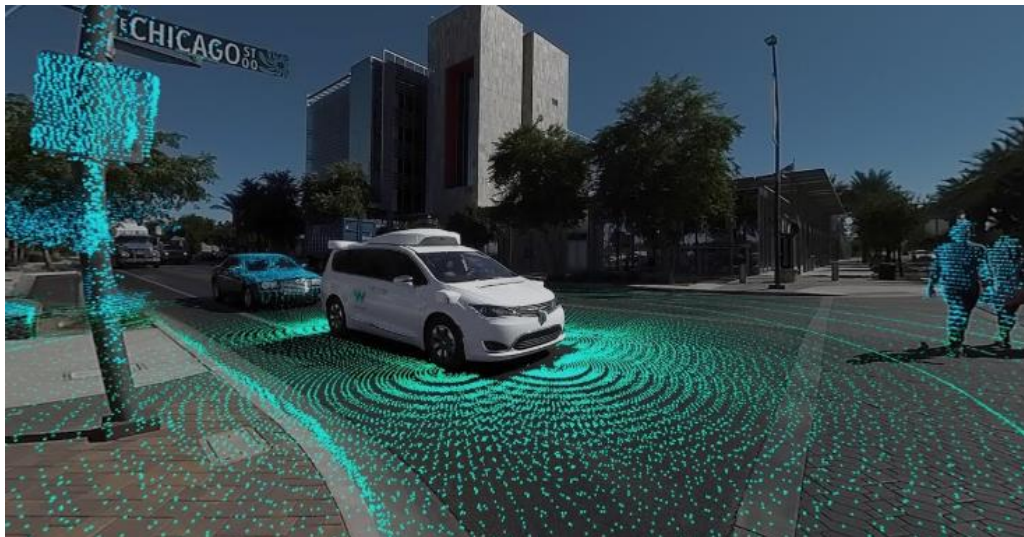


Figura 9: Waymo detección de objetos

En España, este tipo de vehículos es improbable su implementación a corto plazo ya que el gremio de taxistas se opondría, como ya pasó con anterioridad con las aplicaciones como Uber o Cabify.

2.3.3 Prototipo de vehículo autónomo equivalente al metro

En algunas ciudades como por ejemplo Barcelona existe una extensa red de metro, parte de esta ya tiene la capacidad de ser completamente autónoma. Se trata de un proyecto conjunto entre la L9 y la L10 que dispondrá de 31 km y 27 estaciones en funcionamiento. La red de metro tendrá 122 km en total, el 25% de los cuales de funcionamiento automático sin conductor [12]. Como se puede ver en la Figura 10, la estación dispone de mamparas de seguridad para evitar posibles atropellos o saltos a las vías ferroviarias. Estas se abren una vez el metro está completamente parado y es segura su apertura.



Figura 10: Fotografía de la línea 9 del metro de Barcelona.

Durante la fase de pruebas, antes del estreno de la línea, se comprobaron aspectos como las instalaciones eléctricas y de seguridad de las estaciones. También se revisó la ventilación, la energía, las comunicaciones y las puertas automáticas. En total se desarrollaron hasta 3.700 protocolos a lo largo de varios meses.

3. TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN APLICADAS A LA MOVILIDAD AUTÓNOMA

En este capítulo se estudiarán las diferentes tecnologías de comunicación. En un primer punto, se analizarán las tecnologías actuales tanto cableadas como inalámbrica en el contexto del vehículo autónomo, centrándose en su posible uso para el vehículo autónomo. A continuación, se examinará las comunicaciones inalámbricas de nueva generación y se valorará cuál de las posibles opciones (5G o ITS-G5) se adapta mejor a las necesidades del vehículo autónomo.

3.1 Tecnologías de Comunicación Actuales

Al analizar las tecnologías de comunicación para dar soporte al vehículo conectado, se tendrá que estudiar la comunicación de las infraestructuras entre sí I2I, la comunicación del vehículo con otros vehículos V2V y la del Vehículo con las Infraestructuras V2I. Este conjunto se denomina V2X (Vehicle to everything (vehículo a todo)). Como se observa en la siguiente Figura 11, el vehículo deberá tener una comunicación con todo su entorno.

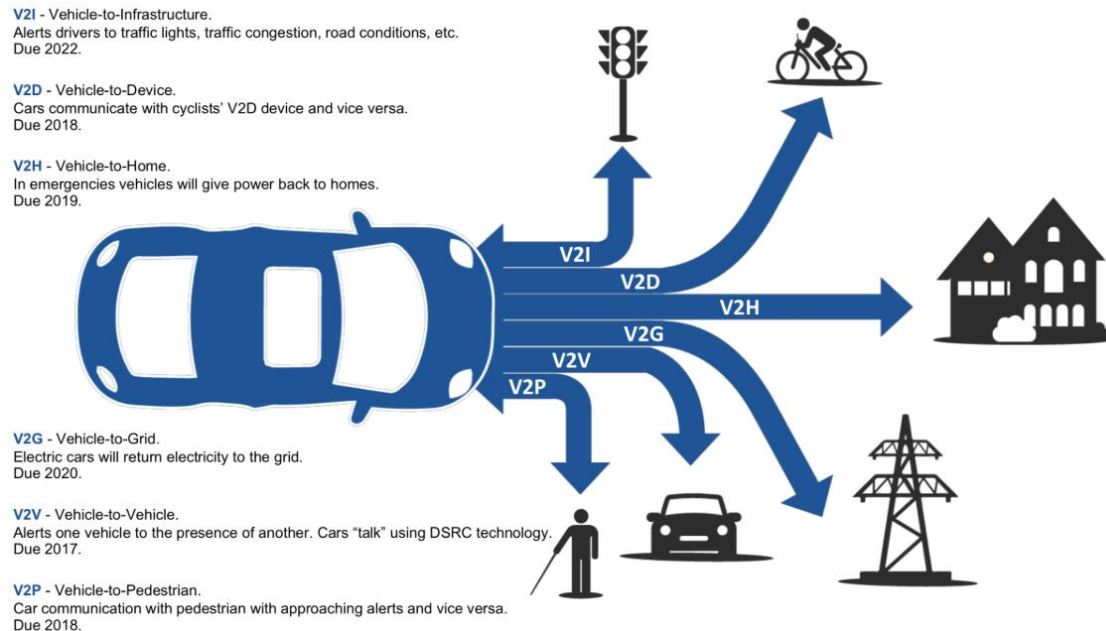


Figura 11: Tipos de comunicaciones [13]

Las tecnologías de comunicación, se pueden separar en dos:

3.1.1 Tecnologías Cableadas

Estas tecnologías se basan en la comunicación mediante un medio físico.

Considerando que en la utilización del vehículo autónomo se precisa de una comunicación constante, es necesaria la comunicación entre vehículos V2V y entre los vehículos y la infraestructura V2I. Por lo tanto, las tecnologías cableadas encontrarán su aplicación en la comunicación de las infraestructuras entre sí I2I.

Para la comunicación entre las infraestructuras se puede utilizar las comunicaciones mediante fibra óptica. Este método de comunicación se basa en impulsos de luz, esta tecnología ofrece una gran velocidad de transmisión junto con un gran ancho de banda.

En esta tecnología existen dos modalidades: fibra óptica monomodo, que se basa en un único haz de luz en el interior de la fibra, esta ofrece una gran distancia de propagación hasta 300km [14] y una elevada velocidad de transmisión (1-10Gbps dependiendo de la distancia) [15]. Por otro lado, existe la fibra óptica multimodo. En esta modalidad se pueden introducir más de un haz de luz en el interior de la fibra, esto implica tener una mayor velocidad de transmisión, aunque limita la distancia entre el dispositivo transmisor y el dispositivo receptor a una distancia máxima de 2-3km.

Esta tecnología aparte del gran ancho de banda, ofrece una latencia baja, como se observa en la siguiente Figura 12. Esta latencia depende de la distancia a la que se encuentran los servidores, siendo baja cuando la cantidad de dispositivos intermedios entre servidor-cliente es pequeña [16].

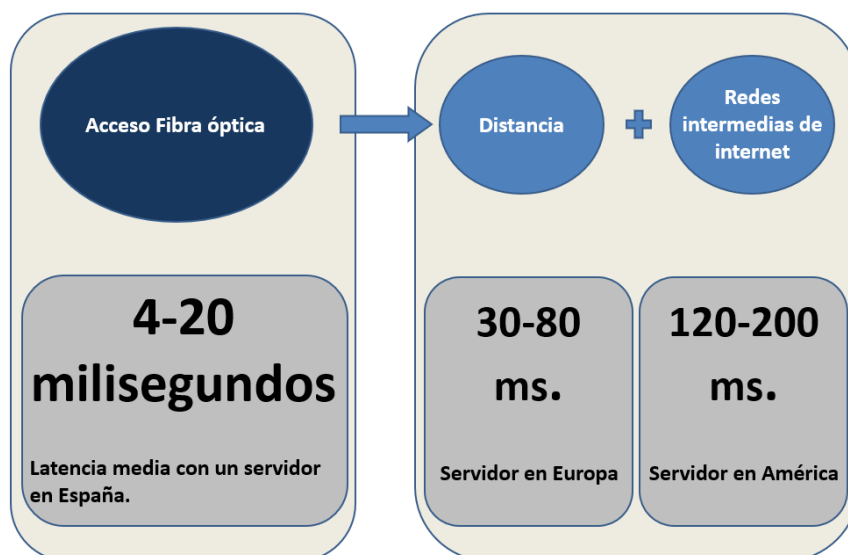


Figura 12: Latencia Fibra Óptica en relación a la distancia [17].

Por lo tanto, se puede determinar que la fibra óptica tiene un papel importante para el vehículo autónomo en las comunicaciones entre las infraestructuras.

3.1.2 Tecnologías Inalámbricas

Las tecnologías inalámbricas más relevantes para V2X se pueden separar en dos estándares:

- Las tecnologías inalámbricas basadas en WiFi (Wireless Fidelity).
- Las tecnologías inalámbricas móviles.

3.1.2.1 Tecnologías inalámbricas basadas en WiFi

La tecnología inalámbrica WiFi tiene un coste reducido y se utilizan dos bandas frecuenciales: 2.4-2.5GHz y la banda de 5.18-5.32GHz [18].

Estas dos bandas frecuenciales, son de uso abierto y tienen una limitación de potencia transmitida para no interferir al resto de usuarios.

Esta tecnología tiene una latencia muy variable a causa de verse fuertemente perturbada por la cantidad de usuarios que estén utilizando cada canal de la banda frecuencial.

3.1.2.2 Tecnologías inalámbricas basadas en redes celulares.

Las tecnologías inalámbricas móviles utilizadas en la actualidad son principalmente dos:

- Tecnología 3G: esta tecnología se basa en el uso de códigos CDMA (Code Division Multiple Access). Este tipo de redes, ofrece una velocidad de transmisión de datos de entre 5-15Mbps (Megabits por segundo) en condiciones óptimas. En la siguiente Tabla 1 se observa las velocidades tanto de subida como de bajada según el estándar utilizado:

	Estándar	Descripción	Velocidad descarga máxima	Velocidad subida máxima
3G	UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	384 kbps	128 kbps
	HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access	7,2 Mbps	3,6 Mbps
	HSPA	High-Speed Packet Access	14,4 Mbps	5,76 Mbps

Tabla 1: Velocidades de transmisión 2G y 3G [19].

- Redes 4G/LTE (Long Term Evolution): se trata de la tecnología móvil más utilizada en la actualidad. Basa su funcionamiento en el uso de OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing) que optimiza el uso del espectro y tiene buena protección contra el multi-path fading (rebote por multi camino). Una de sus desventajas es que requiere un gran sincronismo y un alto PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) [20]. Ofrece un mayor ancho de banda que las tecnologías celulares anteriores y una mayor velocidad de transmisión como se observa en la siguiente Tabla 2.

	Estándar	Descripción	Velocidad descarga máxima	Velocidad subida máxima
4G	LTE (Cat 3)	Long Term Evolution	100 Mbps	50 Mbps
	LTE (Cat 4)	Long Term Evolution	150 Mbps	50 Mbps
	LTE (Cat 5)	Long Term Evolution	300 Mbps	75 Mbps
	LTE-A (Cat 6)	Long Term Evolution Advanced	300 Mbps	50 Mbps
	LTE-A (Cat 7)	Long Term Evolution Advanced	300 Mbps	150 Mbps
	LTE-A (Cat 8)	Long Term Evolution Advanced	1.200 Mbps	600 Mbps

Tabla 2: Velocidades de transmisión 4G [21].

Actualmente, el 4G/LTE es la tecnología inalámbrica más usada. Esta tecnología a pesar de ser la más utilizada, presenta dos limitaciones que la imposibilitan para la aplicación en los vehículos autónomos.

La latencia de las comunicaciones 4G/LTE están alrededor de 100ms para 4G y de 20ms para 4G+ [22]. Para un uso habitual de las comunicaciones de la población con los teléfonos móviles no supone un problema, pero si es una limitación para los vehículos autónomos que requieren una latencia muy baja de entre uno y cinco milisegundos [23].

Con lo dicho anteriormente, parece que el WiFi es la opción que mejor podría cumplir los requisitos básicos, pero la aparición del 5G hace que se deba analizar más en detalle ambas tecnologías.

3.2 Comunicaciones inalámbricas de nueva generación

3.2.1 Tecnología inalámbrica 5G

A continuación, se analizan las características de la tecnología 5G que la convierten en una buena candidata para la comunicación del vehículo autónomo. Los dos parámetros más significativos para que el 5G sea el utilizado en el vehículo autónomo son su latencia y su ancho de banda [24].

La tecnología 5G admite un rango muy amplio de bandas frecuenciales. Las bandas móviles existentes y las bandas ampliadas para 5G. Aparte, da la posibilidad de que el tamaño del canal sea muy flexible, desde 5MHz a 100MHz para bandas que se encuentren por debajo de los 6GHz y tamaño de canal de 50MHz a 400MHz para la banda de 5G alojada en 24GHz -28GHz (5G en banda milimétrica). Como se puede observar en la siguiente Tabla 3 cada frecuencia 5G tiene unas necesidades de ancho de banda diferentes y unas ventajas frente al resto de frecuencias.

Spectrum range	Bands	Coverage	Peak Data rates	Bandwidth	Use Cases
Low band < 1 GHz	<ul style="list-style-type: none"> • 600 MHz (US) • 700 MHz • 900 MHz 	<ul style="list-style-type: none"> • Deep indoor • ~ 10 km 	~100 Mbps	FDD 2x10 MHz	<ul style="list-style-type: none"> • Deep indoor coverage for sensors and IoT (mMTC) • TMO US started to promote also MBB
Mid-band 3 – 6 GHz	<ul style="list-style-type: none"> • 3.4-3.6 GHz (B42) • 3.6-3.8 GHz (B43) • 4.5-4.9 GHz (JPN) 	<ul style="list-style-type: none"> • Same grid as LTE1800 • ~1 km 	~1 Gbps	TDD <100 MHz	<ul style="list-style-type: none"> • 5G eMBB coverage on LTE grid • Major commercial 5G launches are expected in this spectrum range (JPN, KRN, CHN, EUR)
mmWaves > 24 GHz	<ul style="list-style-type: none"> • 26 GHz (EUR) • 28 GHz (KOR, US) • 39 GHz (US) 	<ul style="list-style-type: none"> • Hot spots • Line of sight • 100 m 	~10 Gbps	TDD <1 GHz	<ul style="list-style-type: none"> • Extreme data rates for e.g. VR in local areas like stadiums • Used in US due to lack of 3-6 GHz • Used also in KOR Olympics trial

Tabla 3: Características de cada rango frecuencial 5G [25].

Junto con la implementación del 5G, se deben de ir reduciendo la cantidad de estaciones base 4G debido a que ambas transmiten en los mismos rangos de frecuencia. Esto implica que las estaciones base 4G y 5G tengan que ir sincronizadas y transmitir en periodos de tiempo fijados [26].

Dos de las características más importantes de la tecnología 5G en relación al vehículo autónomo son:

- Mayor ancho de banda: la tecnología 5G ofrece una velocidad de descarga de hasta 20Gbps. En las zonas rurales, a causa de la baja densidad de tráfico, no es necesario aprovechar el máximo potencial del 5G, pero por otro lado, en las grandes ciudades donde hay un gran volumen de tráfico y una concentración de vehículos elevada se necesita todo su potencial.
- Latencia muy baja: esta tecnología ofrece una latencia de 1ms, también ofrece seguridad frente a la desconexión para asegurar que en ningún

momento se pierda la conexión entre los vehículos y el resto de dispositivos.

Para conseguir estos parámetros, es necesario que los operadores puedan asignar canales de cerca de 100MHz para bandas sub 6Ghz y canales de 1GHz en las bandas milimétricas [27].

Algunas de las medidas que están tomando los países para incentivar y favorecer la existencia de canales lo suficientemente amplios por las teleoperadoras son:

- Dar subvenciones e incentivos para la migración antes de la asignación previa del espectro radioeléctrico.
- Trasladar bandas ya utilizadas a otros rangos frecuenciales y disminuir el ancho de banda disponible para otras funciones y de esta manera dejar estas bandas prioritarias a las nuevas tecnologías. En España, está previsto un segundo dividendo digital en 2020 que va a liberar la banda de 700MHz para seguir implementando la tecnología 5G en ella.
- Permitir intercambios entre operadoras para que de esta manera puedan disponer de canales de mayor tamaño.

Actualmente, después de la primera subasta del espectro radioeléctrico, en España el espectro ha quedado de la siguiente manera Tabla 4:

	800 MHz 4G banda 20	900 MHz 2G/3G banda 8	1800 MHz 2G/4G banda 3	2100 MHz 3G banda 1	2600 MHz 4G banda 7	3500 MHz 5G banda 42
Movistar	10 MHz	14,8 MHz	20 MHz	15 MHz FDD 5 MHz TDD	20 MHz	90 MHz
Vodafone	10 MHz	10 MHz	20 MHz	15 MHz FDD 5 MHz TDD	20 MHz FDD 20 MHz TDD	90 MHz
Orange	10 MHz	10 MHz	20 MHz	15 MHz FDD 5 MHz TDD	20 MHz	100 MHz
MásMóvil			14,8 MHz	15 MHz FDD 5 MHz TDD	10 MHz TDD (autonómicos)	80 MHz

Tabla 4: Resultado subasta espectro radioeléctrico España [28].

3.2.2 Tecnología inalámbrica ITS-G5

Se trata de una tecnología basada en el estándar 802.11, el mismo en que se basa la tecnología WiFi. Surgió pensada para comunicaciones de corto alcance, no como el 4G/5G y, por lo tanto, la idea es usar esta tecnología en las comunicaciones V2V. El estándar de esta tecnología (ETSI EN 302 663) [29] es el único que ofrece latencias suficientemente bajas para poder ser aplicada al vehículo autónomo.

La tecnología ITS-G5 no requiere ningún tipo de infraestructura externa para poder realizar la comunicación. Ha sido diseñada para operar en la banda

frecuencial de 5.9GHz y cumple todos los requisitos estipulados por la normativa europea para poder usarse como tecnología de comunicación en los vehículos autónomos.

3.2.3 Comparativa entre 5G y ITS-G5

Viendo los dos apartados anteriores se puede deducir que los dos tipos de tecnología son válidos para los vehículos autónomos. En un principio todos los fabricantes de automóviles americanos apostaban por usar tecnología ITS-G5. Con el paso del tiempo y la fuerte apuesta de la compañía Americana Qualcomm han cambiado de idea y ahora se decantan de manera clara por el 5G [30].

Por otro lado, la unión europea ha hecho el camino inverso. Los fabricantes europeos en un principio se decantaron por el 5G, pero en las recientes votaciones de la junta europea se ha decidido la utilización del G5 para los vehículos autónomos [31].

El último involucrado en esta discusión es el continente asiático y más concretamente la compañía Huawei que apuesta y ha hecho grandes inversiones en desarrollar sus tecnologías basadas 5G [32].

Con la situación actual, nadie sabe con certeza cuál será el camino que se seguirá para el vehículo autónomo, pero según las grandes consultoras del sector lo más probable es una convivencia entre ellas [33].

3.2.4 Convivencia entre 5G y ITS-G5

Observando el panorama internacional y analizando las características básicas de cada una de estas dos tecnologías y con los datos aportados por diferentes empresas como por ejemplo T-Mobile, que es un operador de telefonía ubicado en Alemania, se llega a la conclusión que las dos tecnologías deberán convivir entre ellas [34].

En el caso de la tecnología ITS-G5, lo más probable es que su funcionalidad sea la de la comunicación V2V (Vehicle to Vehicle) para las comunicaciones necesarias entre vehículos autónomos. Por ejemplo, la información de frenado o la comunicación de incidencias en un tramo de carretera.

Para las comunicaciones 5G es probable su uso para las comunicaciones V2I (Vehicle to Infrastructure). Por ejemplo, para la comunicación de la señalización de los cruces de la carretera. También se usará en las comunicaciones entre infraestructuras en caso de que no se puedan realizar vía cableado de fibra óptica.

También cabe mencionar que en el caso de que la tecnología ITS-G5 no se llegue a implementar en los vehículos autónomos, la tecnología 5G puede encargarse de toda la comunicación V2X. Por otro lado, la tecnología 5G es imprescindible debido a que el ITS-G5 no dispone de la capacidad suficiente para encargarse de todas las comunicaciones.

4. ESTUDIO DE LA CAPA ELECTRÓNICA ADICIONAL SOBRE LAS INFRAESTRUCTURAS Y LOS VEHICULOS PARA LA MOVILIDAD AUTONOMA.

El objetivo de este capítulo es analizar la evolución temporal de la capa electrónica adicional necesaria sobre las infraestructuras y los vehículos para hacer posible la movilidad autónoma.

En primer lugar, se observará la evolución temporal de la capa electrónica tanto en las ciudades como en los vehículos. Finalmente, se examinará el impacto de los vehículos autónomos en el ámbito económico, medioambiental y en el apartado de la seguridad.

4.1 Evolución temporal de la capa electrónica para la movilidad autónoma

A continuación, se hace un estudio de la evolución previsible que seguirá la implementación del vehículo autónomo a lo largo de tres etapas, actualidad 2020, medio plazo 2025 y largo plazo 2030.

4.1.1 Evolución temporal de la capa electrónica sobre la infraestructura urbana

Actualidad 2020:

- Se dispone de cámaras en los semáforos que detectan el tráfico y varían la velocidad en los tramos para evitar la aparición de retenciones [35].
- Estudio de cobertura 5G y primeras instalaciones de 5G.

Medio plazo 2025:

- Estaciones base 5G instaladas y dispositivos con la suficiente capacidad computacional para procesar todo el flujo de datos generado.
- Gran cantidad de cámaras que generan información del estado del tráfico en cada momento para que las estaciones base se lo transmitan a los vehículos.
- Implementación de una Inteligencia Artificial que gestionará toda circulación. Esta informará a todos los vehículos autónomos de su área de influencia [36].

Largo plazo 2030:

- Inteligencia artificial (IA) global, que controlará todas las IAs de tamaño reducido ayudando de esta manera a limitar los atascos y haciendo que el tráfico sea más fluido.
- Sistema de comunicación en cada dispositivo (patinete, bicicleta, ...), que informarán a las estaciones base de su ubicación. Esta información será comunicada a la IA para su difusión al resto de vehículos [37].

4.1.2 Evolución temporal de la capa electrónica sobre los vehículos autónomos

Actualidad 2020:

Analizando los nuevos modelos de vehículos de las empresas automovilísticas punteras, se observa que los nuevos vehículos ya poseen las siguientes tecnologías como se puede ver en la Figura 13 [38].

- Sensor de proximidad alrededor de todo el vehículo.
- Sensor de salida de carril.
- Sensor de frenado.
- Protocolo de comunicación entre vehículos.
- Asistente inteligente de cambio de carril en caso de emergencias.
- Control de ángulo muerto de visión mediante indicadores luminosos.
- Asistente de velocidad y control de velocidad crucero.

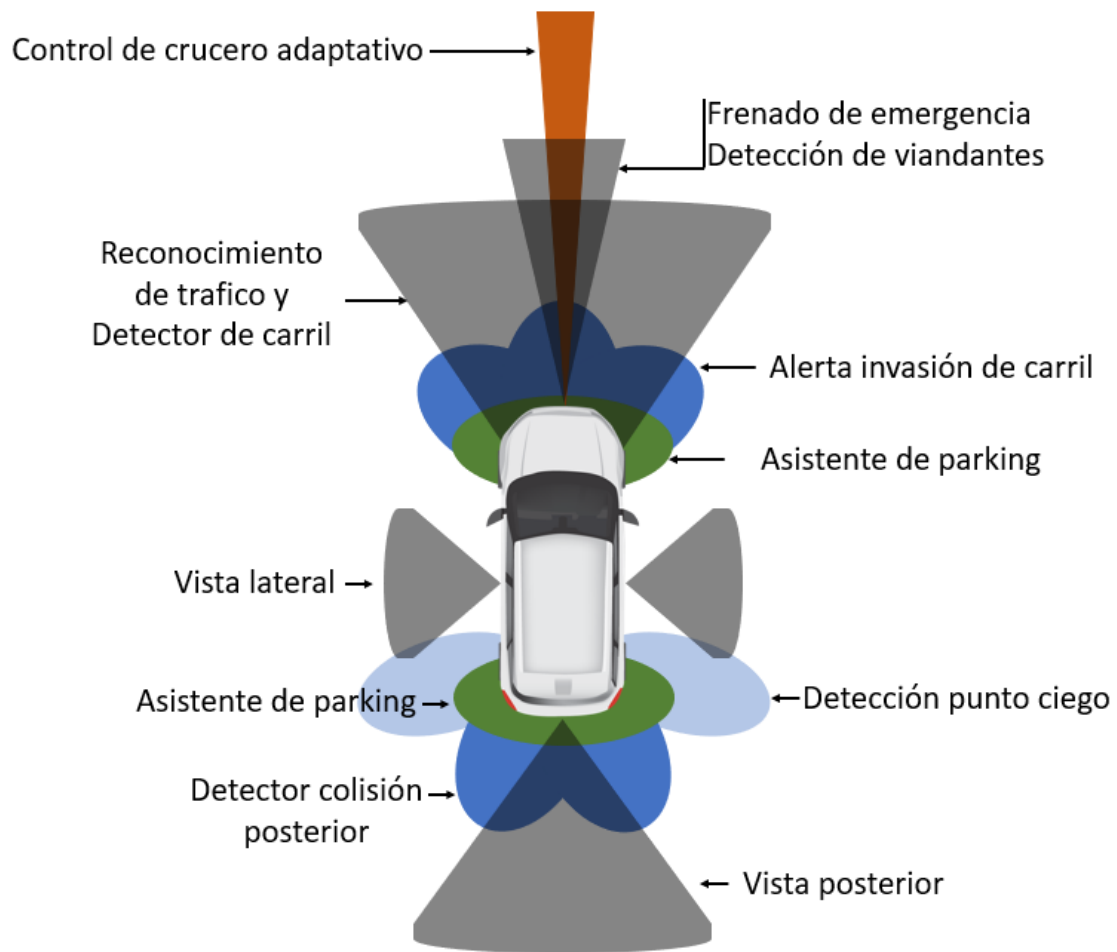


Figura 13: Ubicación sensores vehículo 2020

Medio Plazo 2025

Estudiando las predicciones de las grandes consultoras del sector se prevé que, en 2025, los vehículos dispongan de las siguientes características:

Vehículos → nivel de autonomía 4 [39].

- No se precisará de la intervención humana en largos periodos de tiempo ya que el propio vehículo será quién controlará su propia circulación según las condiciones del entorno.
- En el caso de existir algún fallo en el sistema principal, el vehículo cuenta con respaldo para actuar y seguir conduciendo.
- Antenas 5G MiMo (Multiple Input Multiple Output) para comunicación multidireccional (V2X) [40].

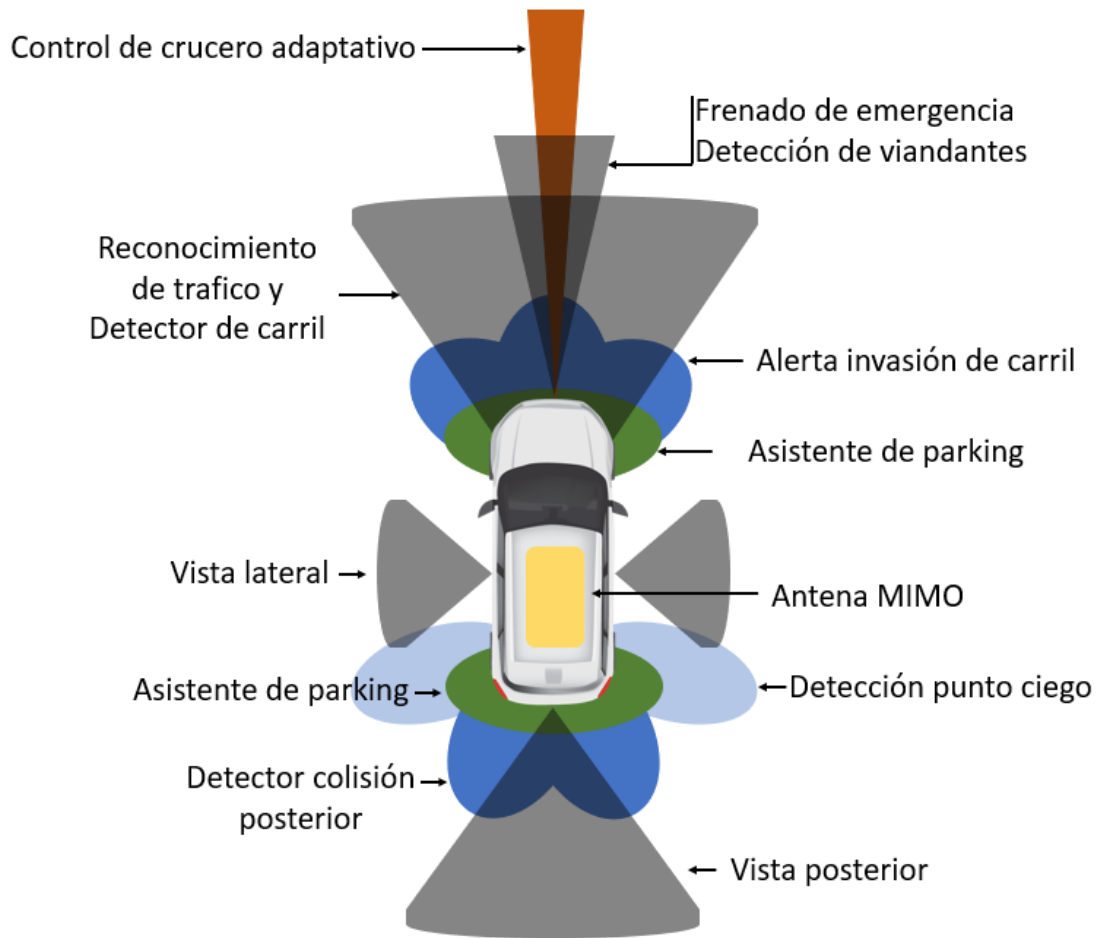


Figura 14: Ubicación sensores vehículo 2025

Largo Plazo 2030

El vehículo será completamente autónomo. Con la ayuda de la inteligencia artificial global, se trazarán las mejores rutas y el vehículo se adaptará a lo que se establezca por la IA. La sensorización propia, quedará relevada a un segundo plano (solo será útil en caso de emergencia).

Vehículos → nivel de autonomía 5 [41].

- No se precisará de la intervención humana en ningún momento ya que el propio vehículo será quien tome las decisiones según las indicaciones de la IA y las condiciones del entorno.

4.2 Impactos socioeconómicos del vehículo autónomo

En este apartado se analizarán los impactos económicos, medioambientales y sobre la seguridad que causará el vehículo autónomo.

4.2.1 Impacto económico sobre el entorno urbano

La implementación de la nueva tecnología tiene un elevado coste a causa de: implementación de sistemas de CCTV (closed circuit televisión), antenas de comunicaciones, Inteligencias Artificiales y todo el mantenimiento que hay tras toda esta infraestructura.

El coste de toda esta infraestructura, se debe de repartir entre todos los entes relacionados en esta causa. Una posible distribución de los costes es la siguiente:

- Sistemas de CCTV implementado en las ciudades, que recogerá los datos para detección de incidentes, lectura de matrículas i gestión del tráfico. Debe estar sufragado por la entidad pública, si no fuera así, las empresas privadas podrían obtener datos privados de la población que podrían utilizar para el beneficio propio.
- Estudio de cobertura 5G e implementación de los sistemas de comunicaciones: ambos costes ya están siendo sufragados por las empresas de comunicaciones móviles. En el caso de España: Movistar, Vodafone, Orange y MásMóvil ya han empezado la instalación de estaciones base 5G en las grandes ciudades.
- Inteligencia Artificial, este es uno de los puntos más críticos ya que controlará toda la circulación a partir de los datos aportados por las cámaras y los vehículos. Este coste debe de ser sufragado a partes iguales entre la entidad pública y las empresas automovilísticas. El control y mantenimiento de la misma lo debe aportar la entidad pública ya que los datos obtenidos por esta son de gran importancia.
- Sensorización de la ciudadanía, estos sensores tienen la función de adquirir datos que se transmitirán a los vehículos para informales de la presencia de peatones cerca de puntos conflictivos para aportar seguridad a los peatones. También debe de ser sufragado por la entidad pública.
- Sistemas de comunicación en los vehículos no autónomos para realizar la comunicación de cada uno de los dispositivos que tengan capacidad para circular. En estos dispositivos se incluyen bicicletas, patinetes, motocicletas, etc.

4.2.2 Impacto medioambiental

En primer lugar, en este apartado se mostrará un estudio realizado sobre la cantidad de vehículos autónomos y su evolución temporal, luego se analizará su impacto en el medio ambiente.

En la siguiente Figura 15 se observa que la cantidad de coches autónomos todavía será reducida entre los años 2020 y 2025, la evolución entre 2025 y 2030 se estima que será mucho mayor. Unos de los factores que ayudará a esa evolución será la existencia de una red de estaciones base 5G completamente extendida. En azul se muestra la estimación prevista, en gris una estimación optimista y en naranja la estimación pesimista.

Se estima que los habitantes europeos renuevan su automóvil aproximadamente cada 10-11 años [42]. A partir de este dato, se estima que en 2030 el 15% de los vehículos serán autónomos.

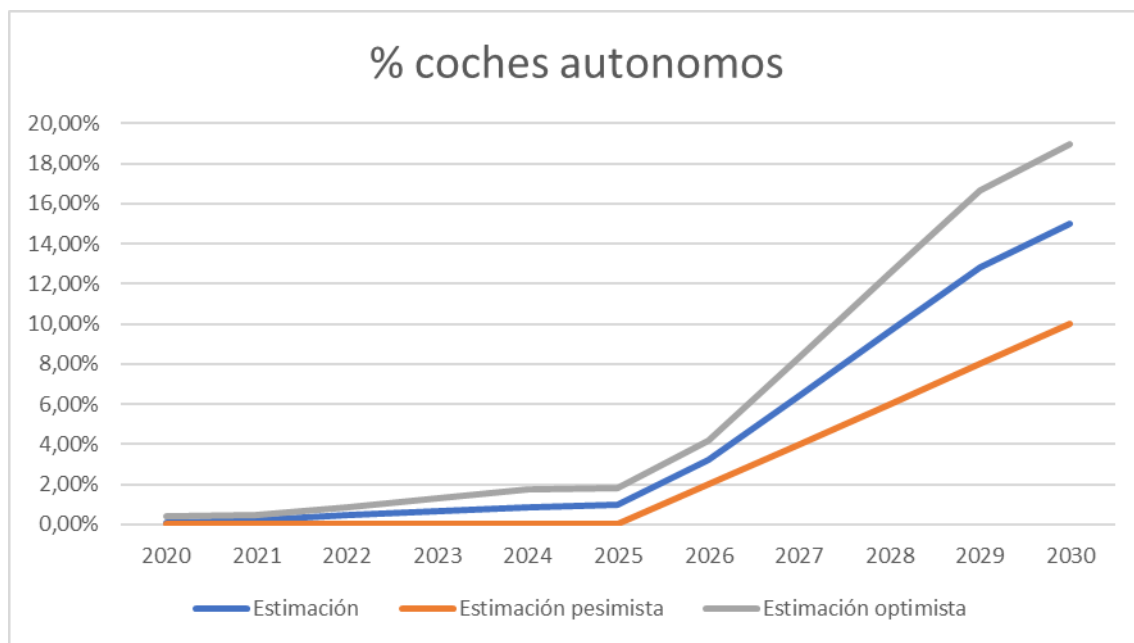


Figura 15: Evolución cantidad de coches autónomos 2020-2030

Con los datos anteriormente comentados y como se puede ver en la siguiente Figura 16, la conclusión a la que se llega es que los vehículos autónomos se irán imponiendo al resto de vehículos hasta llegar aproximadamente al 99.9% de ellos entre 2045 y 2050, quedando un uso residual de aproximadamente un 0.1% de vehículos de combustión fósil [43].

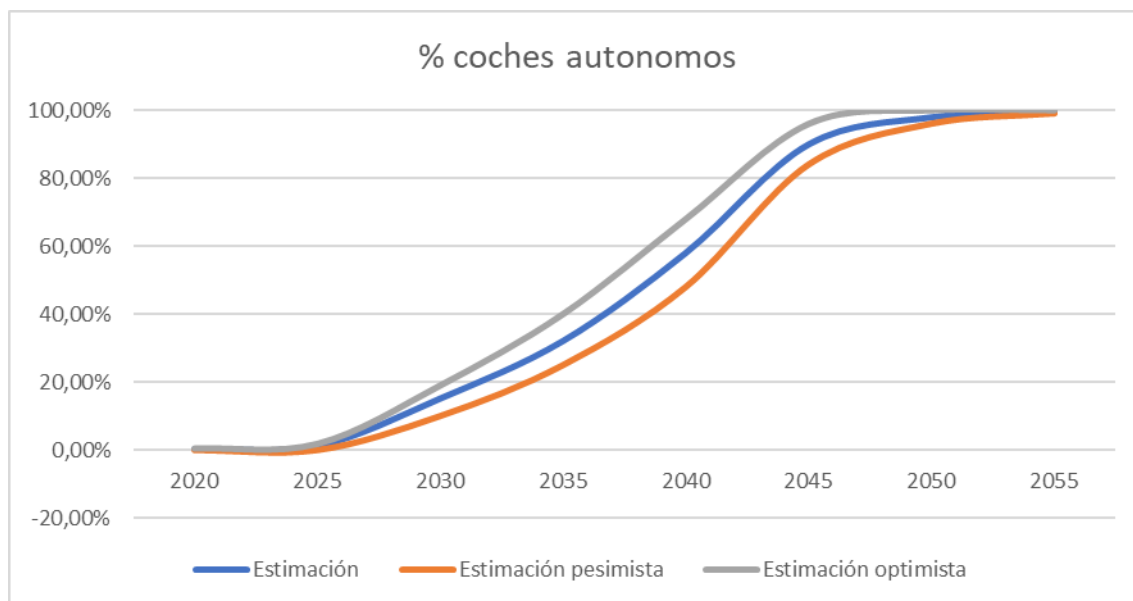


Figura 16: Evolución a largo plazo de cantidad de coches autónomos

A causa de lo comentado anteriormente los niveles de contaminación disminuirán drásticamente.

En la Figura 17, se observa en color azul la línea de tendencia de la cantidad de contaminación actual, que por las normativas y la evolución tecnológica se va reduciendo. La naranja representa el cambio con la inclusión de los vehículos autónomos eléctricos. La cantidad de contaminación generada por los automoviles se ve reducida en aproximadamente un 80% en 30 años [44].

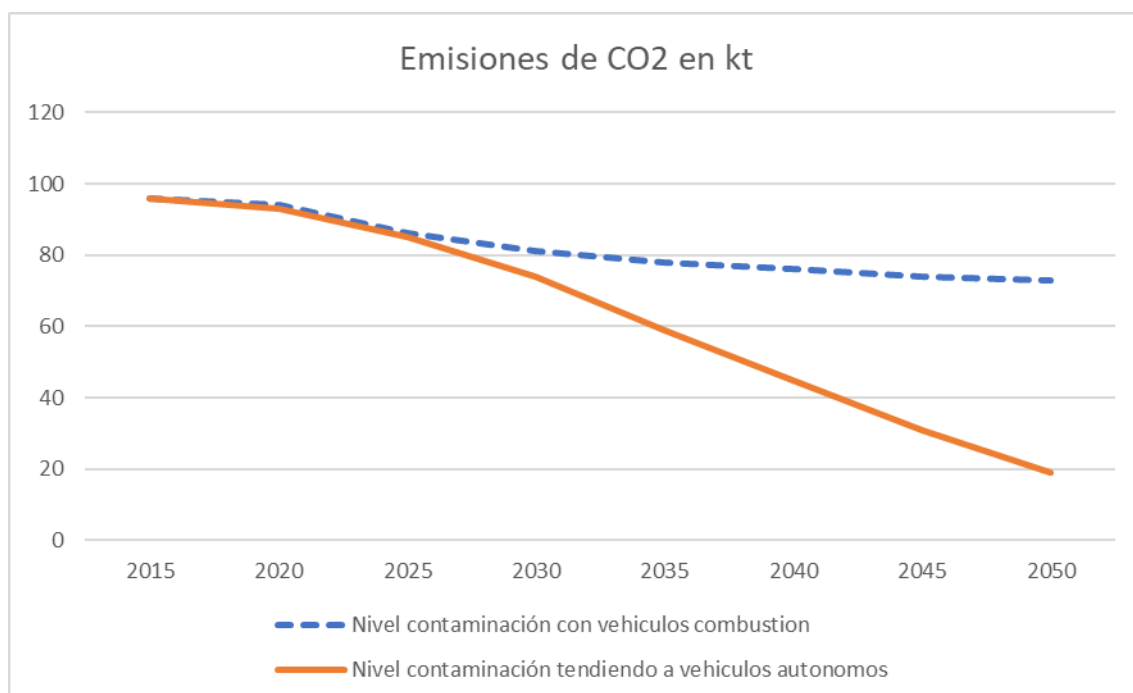


Figura 17: Evolución emisiones de CO2 con la inclusión de los coches autónomos eléctricos.

España para favorecer la reducción de las emisiones de CO₂, en las grandes ciudades como Barcelona y Madrid, se han realizado dos planes de actuación. En Madrid el llamado Madrid 360. Este no permite a los vehículos sin distintivo acceder al centro de Madrid. Los vehículos con distintivo medioambiental B o C pueden acceder, pero no pueden realizar estacionamiento en parkings no privados [45].

El plan que está realizando Barcelona se llama ZBE (Zona de Baixes Emissions) [46]. Este plan no permite a los vehículos sin distintivo ni acceder ni circular en Barcelona ni en sus municipios colindantes como Hospitalet de Llobregat, Cornellá de Llobregat, Esplugues de Llobregat y Sant Adrià de Besòs durante el horario de 7h de la mañana a 20h de la tarde.

El estado español también quiere favorecer la reducción de la contaminación en todo el estado y no solo en las grandes ciudades. Por ello, está estudiando prohibir la matriculación de vehículos de combustión a partir del año 2040 [47], para conseguir en 2050 que la totalidad de los vehículos sean de cero emisiones.

4.2.3 Impacto sobre la seguridad

Cuando se habla sobre la seguridad en los vehículos autónomos se debe tratar dos aspectos importantes, que en castellano solo existe una palabra para referirse a ellos. Estos dos conceptos ingleses son:

- “Safety”: esta palabra se relaciona con peligros que suponen un origen de riesgo para la salud y la vida humana, el medioambiente, la producción y los bienes [48]. En caso del vehículo autónomo se trata de las medidas preventivas para evitar los accidentes.
- “Security”: se relaciona habitualmente con los ciberataques. Estas amenazas siempre se asocian a la voluntad de las personas para hacer daño u obtener un beneficio propio. Si se habla del vehículo autónomo, se refiere a ataques que puedan intentar el robo de datos o provocar accidentes. Estos ataques van dirigidos contra el software del vehículo.

Una vez definidos ambos conceptos, en primer lugar se hablará de “safety”. Con la implementación de los vehículos autónomos y según los estudios, los accidentes de tráfico con víctimas humanas se verán reducidos hasta un 90% [49]. Esto es debido a que la mayoría de los accidentes son causados por errores humanos. Los accidentes no pueden ser reducidos totalmente ya que hay accidentes que son causados por fallos mecánicos que una inteligencia artificial no puede solucionar.

Como se puede observar en la siguiente Figura 18, con la inclusión del vehículo autónomo a lo largo de los años, la cantidad de accidentes con víctimas va reduciéndose. La línea azul sigue la tendencia actual de reducción de accidentes, la línea naranja contiene los datos que se calculan con la

interpolación entre la cantidad de vehículos autónomos vendidos y la cantidad de accidentes. Se observa que se pueden llegar a reducir considerablemente.

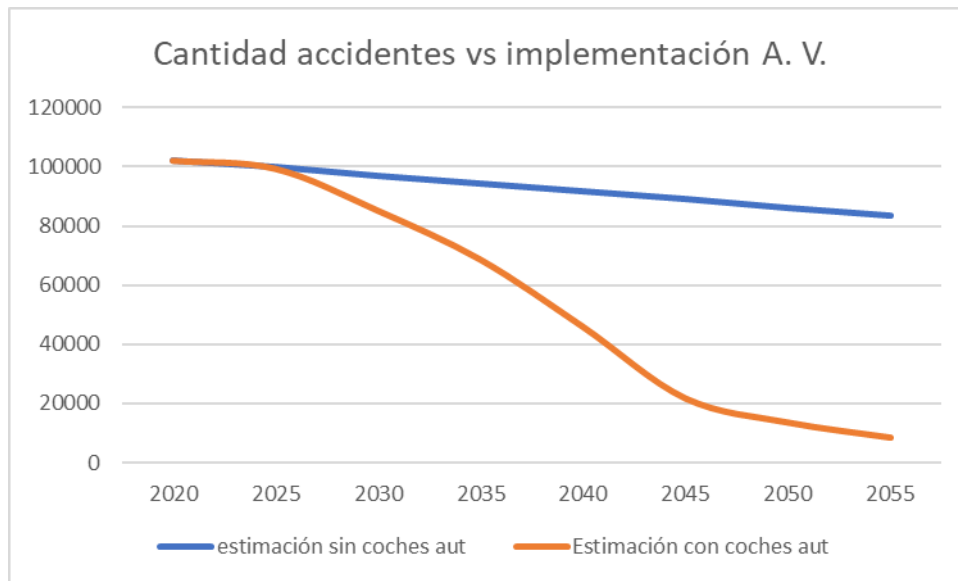


Figura 18: Evolución accidentes con víctimas. [50]

A continuación, se hablará sobre “security”. Cuando se diseña cualquier dispositivo electrónico se debe tener en cuenta que son dispositivos susceptibles a delitos informáticos. Se trata de un punto crítico ya que, si los usuarios no se sienten protegidos frente a los ataques informáticos, el uso del vehículo autónomo podría verse afectado.

Cuando se está hablando de “security” existen cuatro puntos críticos [51]:

- Ataques a la capa de aplicación: estos ataques se realizan sobre un único vehículo y sobre una única aplicación del mismo. Estos ataques modifican o enmascaran algunos de los mensajes enviados o recibidos por el vehículo. Esto puede generar inestabilidad e incluso accidentes. Estos ataques son muy difíciles de detectar y de actuar sobre ellos ya que el dispositivo invasor que también utiliza un certificado válido. Para detectar este problema, se utilizan las técnicas de detección de mal comportamiento. Estas técnicas requieren de múltiples fuentes de datos y a pesar de ello, no garantizan una detección perfecta de todas las posibles anomalías.
- Ataques sobre la red: Consiste en atacar un conjunto de usuarios grande en un mismo momento. Esto se puede realizar mediante, por ejemplo, un ataque de denegación de servicio (DoS). Para evitar esto, los vehículos autónomos deberán equipar un módulo de seguridad hardware a prueba de manipulaciones que se encargará de almacenar las claves criptográficas y del cifrado de los datos. A parte de este módulo, los vehículos también estarán equipados con múltiples sistemas de sensores, que en momentos de bloqueo de la red tomarán el control del vehículo.

- Ataques a nivel del sistema: estos ataques se centran en modificar el hardware o el software del vehículo. Estos ataques se realizan físicamente y el principal problema que generan es que no modifican ninguno de los parámetros de seguridad de los vehículos. Por lo tanto, son indetectables. La única posibilidad para solventar esto es utilizar sensores a prueba de manipulaciones, que o son muy costoso para su implementación a gran escala o no están disponibles en estos momentos.
- Ataques sobre la privacidad: estos ataques se realizan sobre los datos transmitidos periódicamente por los vehículos como, por ejemplo: su velocidad, su posición actual o su aceleración. Las escuchas son un tipo de ataque pasivo y, por lo tanto, difíciles de detectar, especialmente en la comunicación inalámbrica de difusión. Sin embargo, es posible evitar con éxito las escuchas ilegales utilizando cifrado. Con el cifrado, se puede lograr la privacidad de los datos. Otro camino es utilizar técnicas de anonimato para conseguir la privacidad de la identidad y la ubicación. El anonimato se implementa típicamente usando firmas grupales o certificados a corto plazo.

Para reducir estos ataques se pueden implementar algunas aplicaciones para detectarlos como las que se explican a continuación [52]:

- Verificaciones periódicas de las informaciones de todos los sensores del vehículo contrastando si toda la información aportada por ellos es coherente.
- Delegar información entre sensores en caso de duda sobre el estado de algún sensor. Se puede descartar esta información y contrastarla con otra información de mayor relevancia para comprobar si la información suministrada es correcta.
- Utilización de dispositivos que tengan los ocupantes del vehículo para generar información redundante, si la información ofrecida por el GPS (Global Positioning System) de los ocupantes y del vehículo no es la misma puede verse comprometida la seguridad tanto del vehículo como de los pasajeros.

5. CALCULO DEL DESPLIEGUE DE ESTACIONES BASE PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA COBERTURA 5G PARA LA MOVILIDAD URBANA CONECTADA

Como se ha comentado anteriormente en el capítulo del estudio de la capa electrónica adicional sobre las infraestructuras y los vehículos para la movilidad autónoma, en el apartado de la evolución temporal de la capa electrónica sobre la infraestructura urbana, se debe realizar un estudio de cobertura 5G en ambas frecuencias (sub 6GHz y >24GHz) y emplazamientos de las estaciones base. No se realizará el estudio para ITS-G5 ya que como se ha comentado en anteriores capítulos, no es una tecnología óptima para V2I.

En el capítulo sobre el estudio de la capa electrónica adicional sobre las infraestructuras y los vehículos autónomos se han estudiado las diferentes implicaciones que comporta la implementación del vehículo autónomo, todas ellas necesitarían un estudio específico. Este capítulo se centra en la que es considerada la tecnología primordial y se cree que será la más extendida e indispensable para la implementación del vehículo autónomo, la tecnología 5G.

A continuación, se explica cómo se ha realizado una planificación de estaciones 5G en un área de la ciudad de Barcelona, en la zona de la Sagrada Familia que también incluye la zona de la Diagonal y de calle Aragón, dos de las calles más transitadas de la ciudad. Esta simulación, permite observar los resultados para todo tipo de calles, tanto principales como secundarias.

Se estudia la ubicación, orientación y número de estaciones base 5G que debe haber en una zona determinada para que indistintamente de donde esté el vehículo autónomo, este, pueda circular sin el riesgo de quedarse incomunicado con la infraestructura.

5.1 Simulación numérica de los niveles de potencia sobre una trama urbana

5.1.1 Herramienta de cálculo de cobertura

Para realizar esta simulación se ha usado el software Altair con un complemento del propio software llamado WinProp, junto con la herramienta ProMan y WallMan incluidas en el propio software de Altair. Este programa permite realizar el cálculo de niveles de potencia en cualquier punto o zona determinada de cualquier ambiente urbano, teniendo en consideración edificios y vegetación. En este caso, una trama urbana de la ciudad de Barcelona.

5.1.2 Creación de la base de datos de la trama urbana seleccionada

El primer paso para poder realizar la simulación es obtener un plano con los datos de los edificios y el ancho de las calles del área de la ciudad que se quiere analizar. Para ello se puede usar la página web: <https://www.openstreetmap.org/>

En esta página se puede seleccionar el área de ciudad que se desee y descargarla en formato “.osm”, formato que más adelante Winprop modifica por uno propio. En este caso se selecciona la zona de la Sagrada Familia de la ciudad de Barcelona.

Como se aprecia en la siguiente Figura 19 se marca la zona deseada y se selecciona la opción exportar.

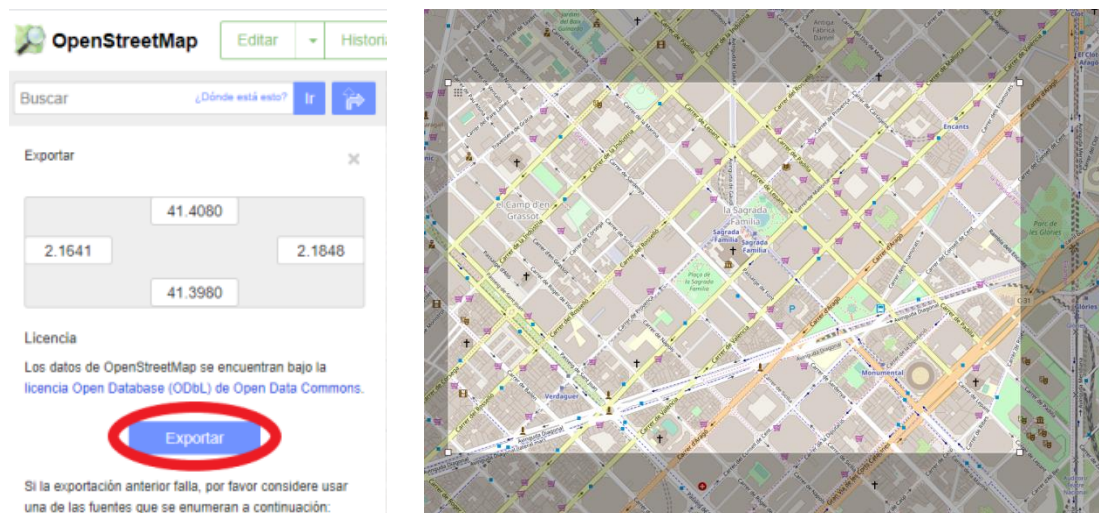


Figura 19: web <https://www.openstreetmap.org/> donde se selecciona la zona deseada.

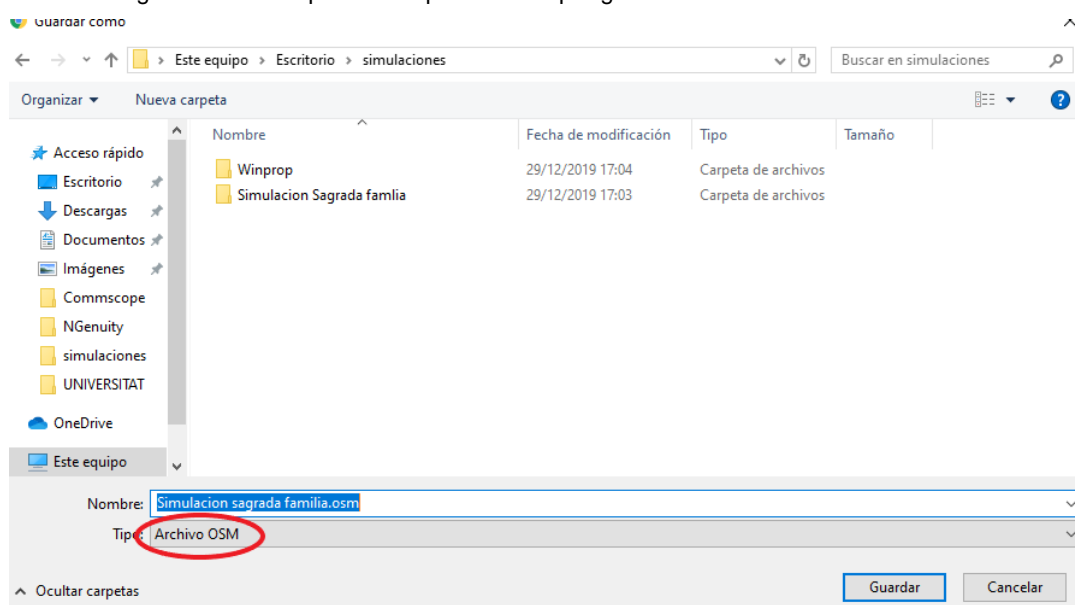


Figura 20: Archivo con formato “.osm”

Se descarga un archivo “.osm” como se ha mencionado anteriormente.

El siguiente paso es ir al software WinProp. Se selecciona la opción Wallman. Esta opción permite crear una base de datos con los elementos de la zona seleccionada con la que Winprop trabajará para realizar todas las mediciones como se observa en la Figura 21.

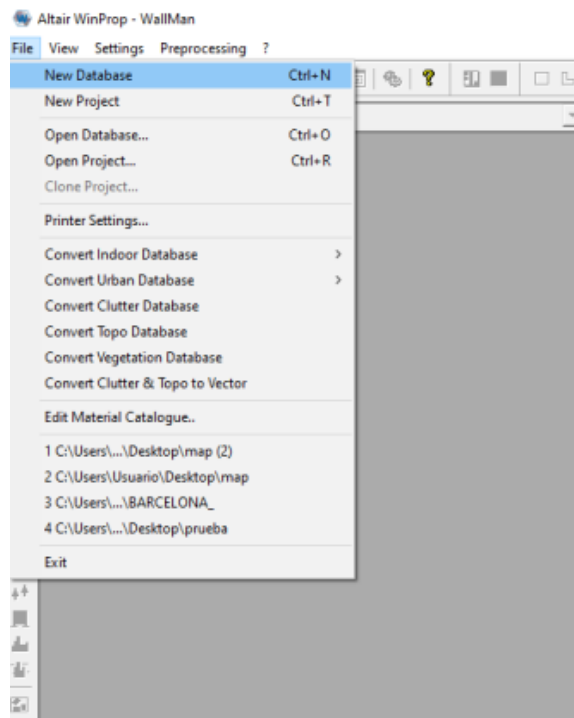


Figura 21: Crear nueva base de datos en WallMan.

A continuación, aparecerá una pantalla para configurar la nueva base de datos como se aprecia en la Figura 22. Se debe especificar si se trata de un estudio “indoor” (interior de un edificio) o “Outdoor” / “Urban” (para un estudio en el exterior). También se debe indicar si se desea crear una base de datos desde el principio y dibujarla manualmente o alternativamente, si se usará una base de datos de una fuente externa. También existe la opción de crear una base de datos de materiales para edificios y vegetación.

En este caso se selecciona la opción *Urban building data base*. Se selecciona la opción *Convert file* debido a que se usará un mapa externo y se seleccionará el catálogo de materiales del propio software.

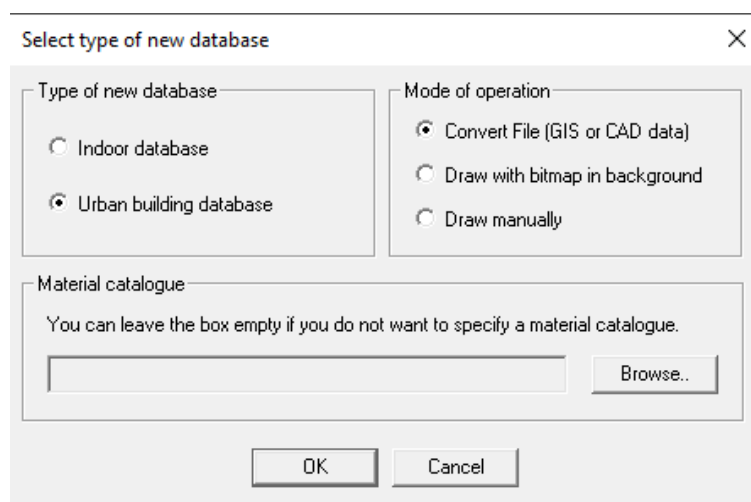


Figura 22: Menú de configuración de la base de datos.

En las siguientes pantallas, Figuras 23 y 24, es donde el programa convierte el archivo “.osm” en una base de datos de formato propio. Para de esta manera poder dibujar un plano 2D y 3D de la zona seleccionada. Se completa con los siguientes datos:

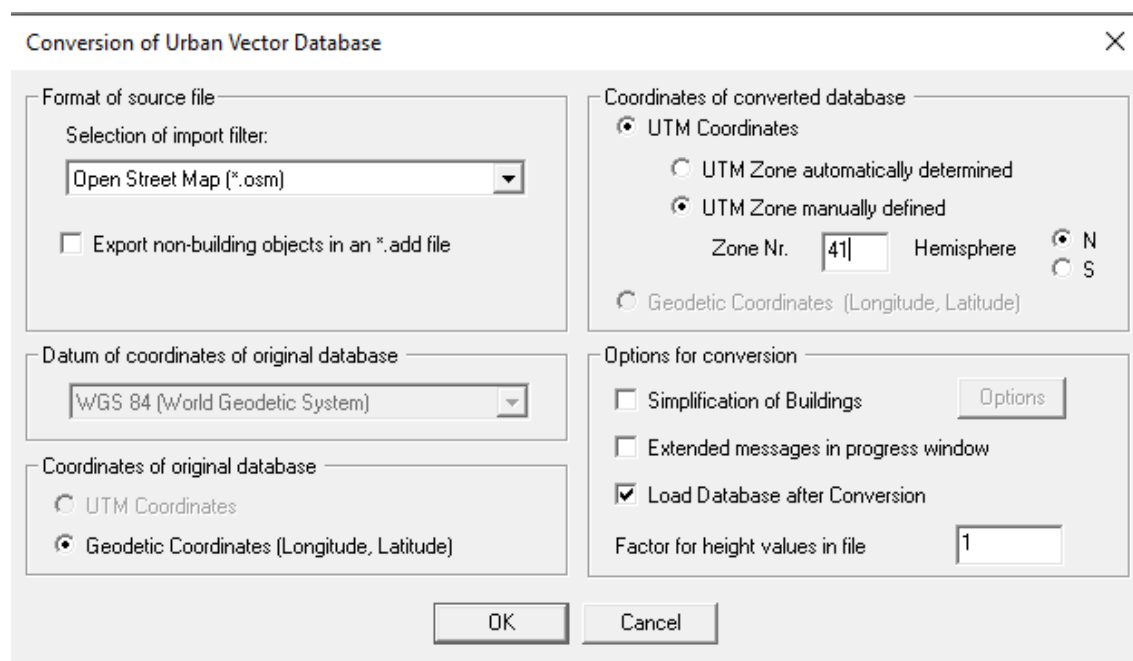


Figura 23: Especificación del formato de entrada del archivo y las coordenadas geográficas de la zona elegida.

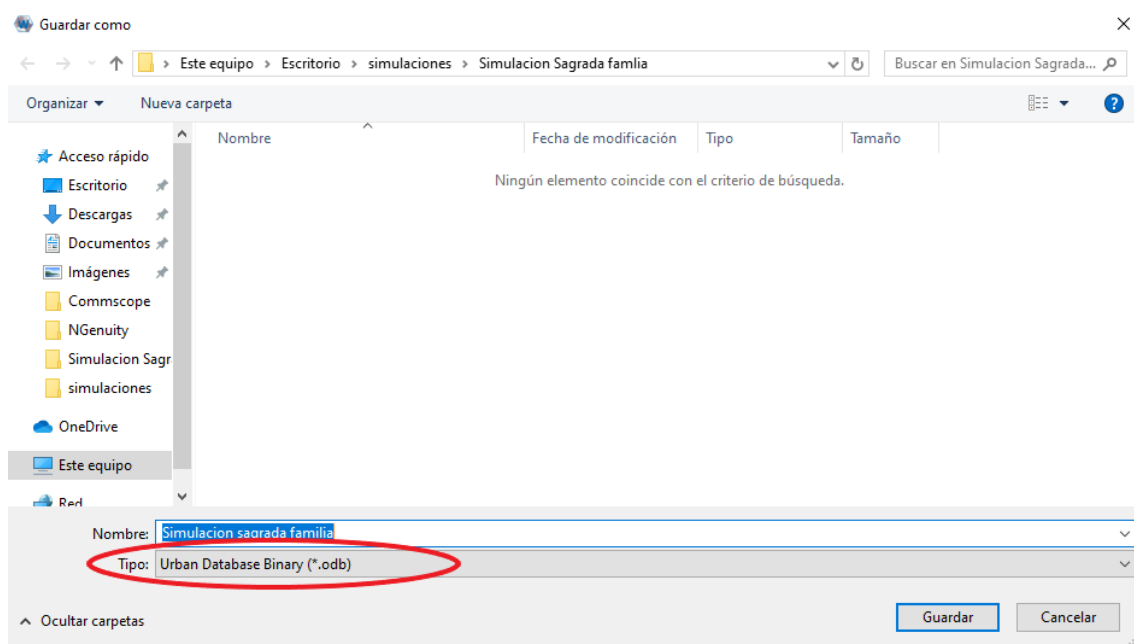


Figura 24: Base de datos creada con el formato de WinProp.

La base de datos ya ha sido creada y ahora se puede observar el resultado en la Figura 25:

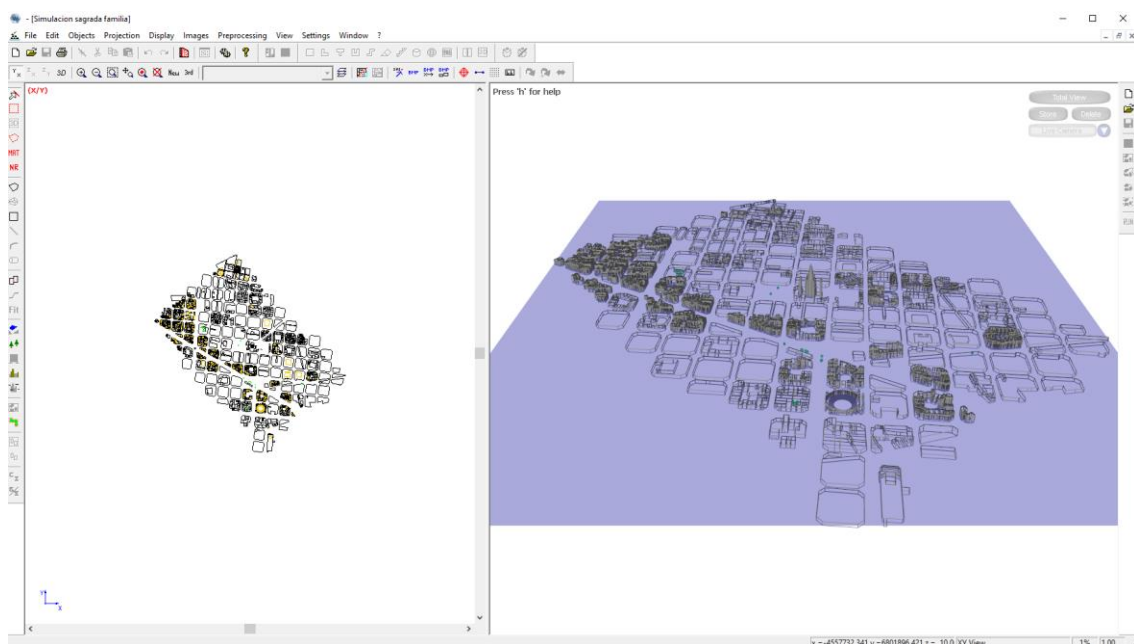


Figura 25: Área seleccionada de Barcelona en 2D y 3D

Se obtiene el plano del área seleccionada en 2D y 3D. La base de datos incluye la posibilidad de modificar la altura o posición de los edificios o incluso eliminarlos manualmente si es preciso.

Una vez se ha obtenido la base de datos, se usará la herramienta ProMan para realizar la distribución de las estaciones base y las simulaciones necesarias.

5.1.3 Configuración de los parámetros de las estaciones base

Una vez la base de datos esta creada es el momento de usar la herramienta ProMan. Con este software se posicionarán las estaciones base sobre la base de datos del plano y el programa mostrará la potencia recibida en cualquier punto. Esto permite ver cuáles son las ubicaciones, orientaciones y número óptimo de estaciones base a instalar para que toda la zona tenga cobertura.

El primer paso es crear un proyecto nuevo en ProMan como se muestra en la siguiente Figura 26:

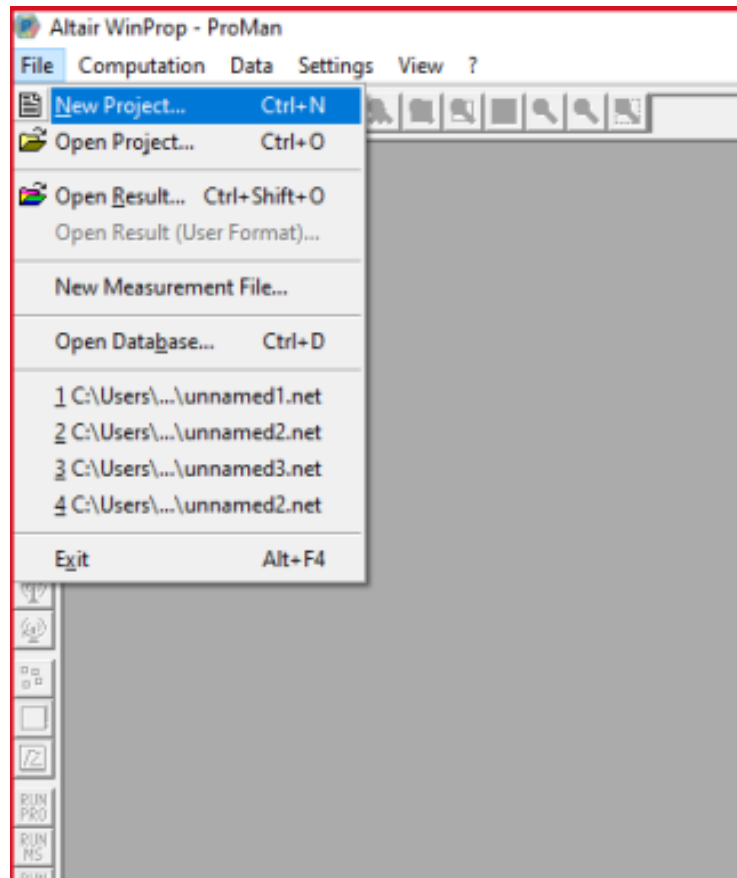


Figura 26: Se crea un nuevo proyecto en ProMan.

La configuración a seguir será la que se mostrará en la siguiente Figura 27. Primero se selecciona la opción para realizar un análisis de la propagación y poder ver la potencia recibida, por lo que se marca "Propagation Analysis". A continuación, se selecciona la opción "Urban Scenario" debido a que se trabajará en un entorno urbano y no en el interior de un edificio o en un ámbito rural. Finalmente, se indica la ubicación del archivo de la base de datos creada en el apartado anterior.

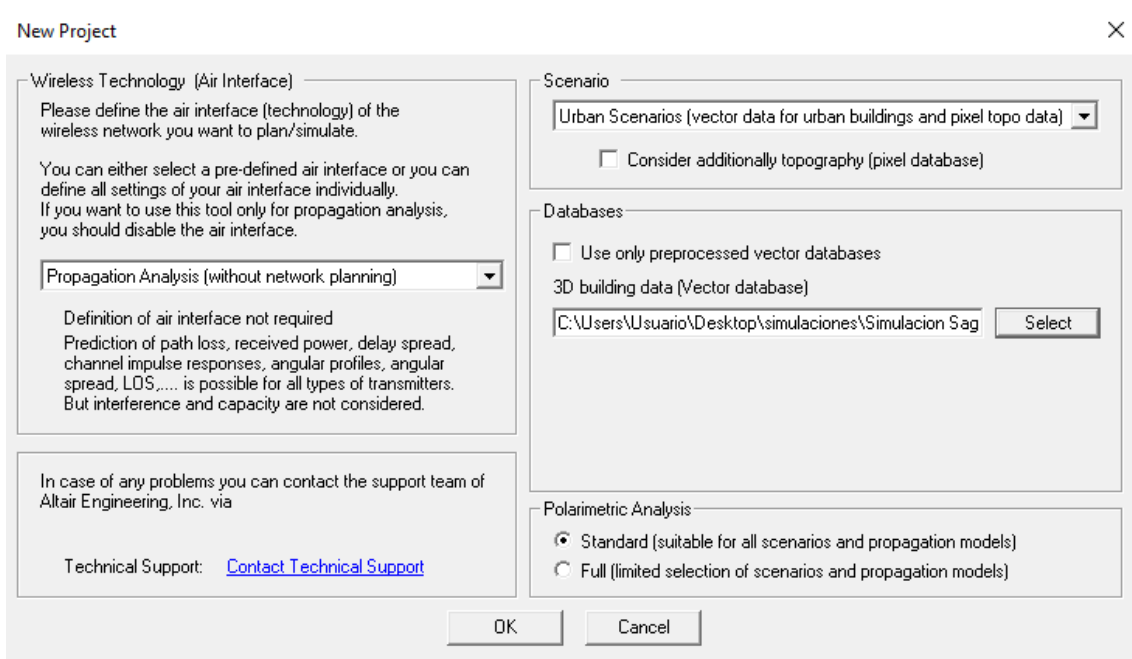


Figura 27: Características del nuevo proyecto en Proman.

Con la base de datos cargada aparece la siguiente Figura 28 en pantalla:

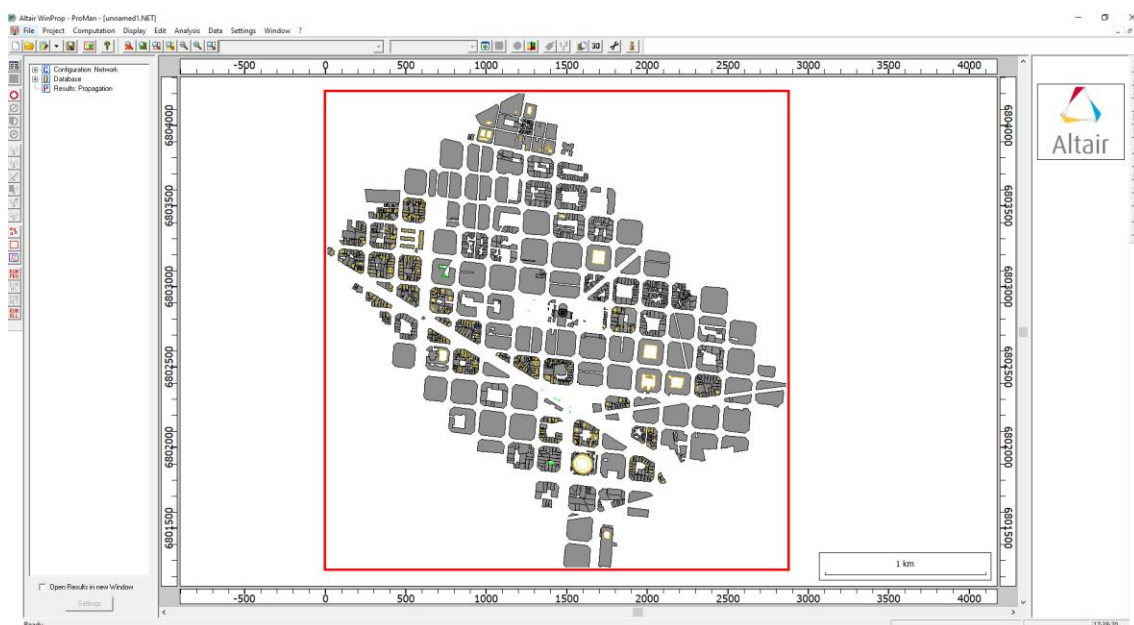


Figura 28: Imagen 2D del área de Barcelona seleccionada.

En esta ventana Figura 29, también hay la posibilidad de ver el área seleccionada en 3D, pero ya no es posible modificar la altura o la posición de los edificios. Esta opción solo está disponible en la creación de la base de datos, pero en este momento ya se está trabajando sobre ella.

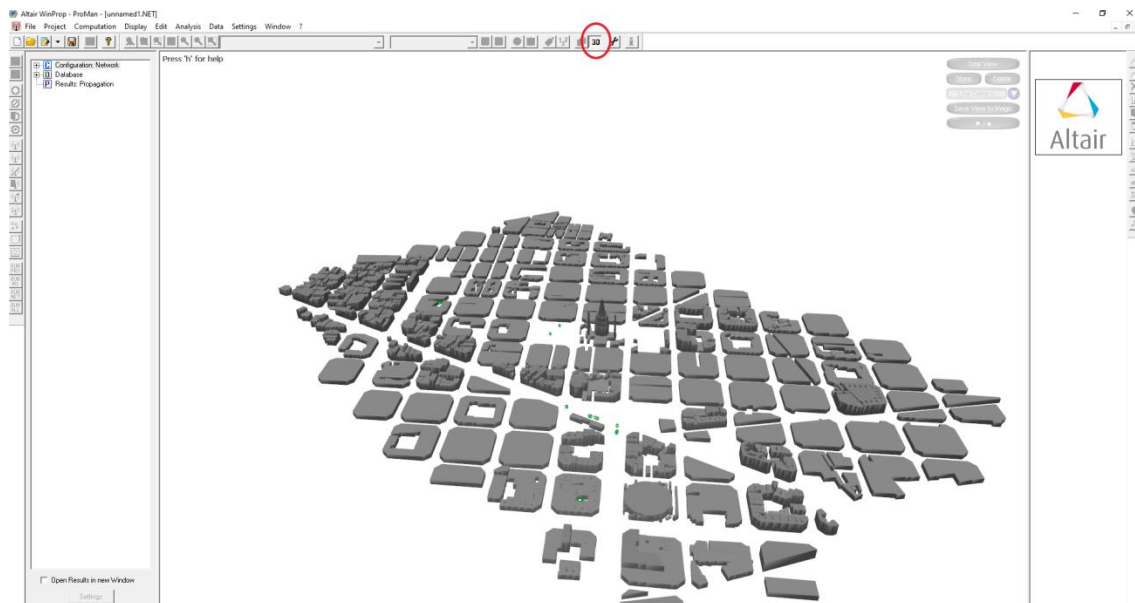


Figura 29: Imagen 3D del área de Barcelona seleccionada.

El siguiente paso a seguir es ya la colocación de la estación base en el plano. Para ello se debe seleccionar la opción *Project* → *Sites*. Aparece la configuración más básica del transmisor como se observa en la Figura 30. Más adelante se podrá detallar más a fondo que características debe tener la estación base.

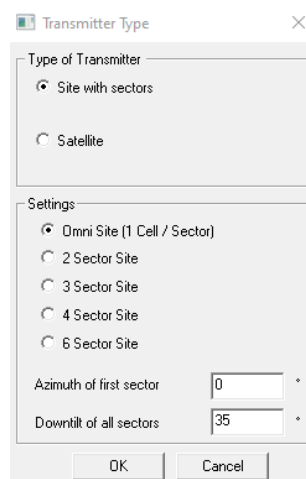


Figura 30: Características básicas del transmisor

Se selecciona que se trata de un transmisor con sectores, se indica el número de sectores del transmisor y se corrige el azimut y la inclinación de la antena, aunque estos dos parámetros se pueden modificar más adelante. Finalmente se indica en que ubicación se quiere instalar el transmisor en el plano 2D como se observa en la Figura 31.



Figura 31: Se indica la ubicación de la estación base

En este punto si se marca la opción de mostrar las características de la estación base ya aparecerá una ventana con más especificaciones para configurar el transmisor. Se pueden modificar las siguientes características como se ve en la Figura 32:

1: Frecuencia de trabajo, en este caso se usará la frecuencia de 3,6 GHz para la banda de 5G sub 6GHz.

2: La potencia de transmisión será la indicada por el fabricante de la estación base. En este caso 35 Vatios. En el anexo se adjunta la hoja de especificaciones del transmisor.

3: Polarización. En este caso Linear de + 45° como indica el fabricante.

4: Altura del mástil de la antena. Se puede referenciar respecto a la altura del suelo en el que se ubica el punto (Toma el tejado como altura 0), o respecto al nivel del mar.

5: Características de la antena: En este punto se puede modificar el azimuth e inclinación anteriormente seleccionados. También da la opción de cargar el archivo con el patrón de la antena suministrado por el fabricante. Si se selecciona la opción “show”, se observa en la Figura 34 el patrón de la antena.

Figura 32: Características completas del transmisor.

La antena utilizada para esta simulación es la VVSSP-360S-F, Figura 33, de la empresa CommScope [53]. En el anexo se adjunta la hoja de especificaciones completa, pero a continuación se muestra la Tabla 5 con las características principales. También se usa la opción “Show” para ver su patrón.



Figura 33: VVSSP-360S-F [53].

Electrical Specifications

Frequency Band, MHz	1695–1920	1920–2180	2300–2690	3400–3800	5150–5925
Gain, dBi	6.6	7.3	8.2	4.9	5.1
Beamwidth, Horizontal, degrees	360	360	360	360	360
Beamwidth, Vertical, degrees	21.9	19.1	15.6	39.0	22.4
Beam Tilt, degrees	7	7	7	0	0
USLS (First Lobe), dB	14	14	12	19	9
Isolation, Cross Polarization, dB	25	25	25	25	25
Isolation, Inter-band, dB	28	28	28	28	28
VSWR Return Loss, dB	1.5 14.0	1.5 14.0	1.5 14.0	1.5 14.0	1.5 14.0
PIM, 3rd Order, 2 x 20 W, dBc	-153	-153	-150		
Input Power per Port, maximum, watts	125	125	125	35	5
Polarization	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 45^\circ$
Impedance	50 ohm	50 ohm	50 ohm	50 ohm	50 ohm

Tabla 5: Especificaciones VVSSP-360S-F[54].

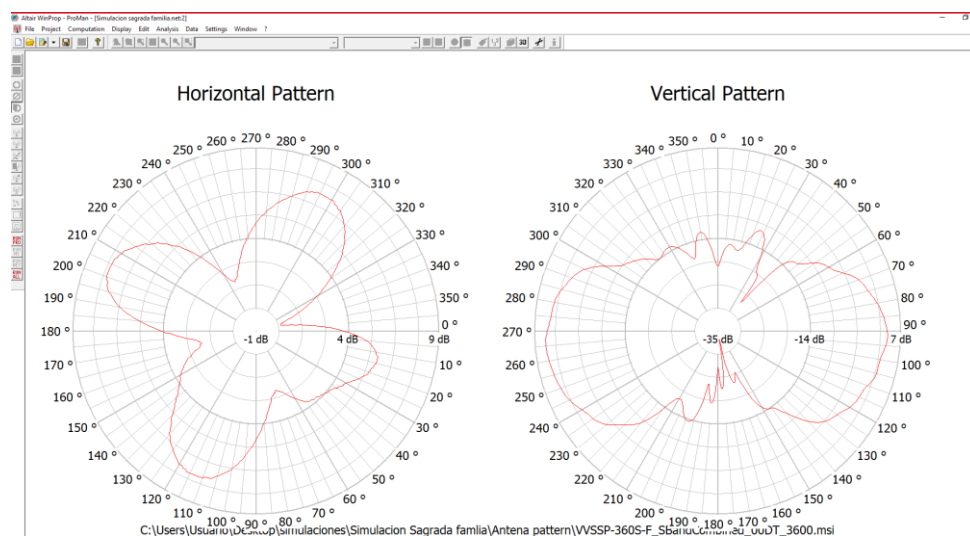


Figura 34: Patrón VVSSP-360S-F a 3,6 GHz.

5.2 Diseño de la red de estaciones base en la trama urbana de la Sagrada Familia

5.2.1 Estudio de la cobertura sobre una trama urbana de una primera estación base

Una vez terminado este paso solo queda indicarle al programa que realice los cálculos y que muestre los resultados para posteriormente analizarlos. Se marca la opción “Run all” y aparecen por pantalla los siguientes resultados Figuras 35 y 36:

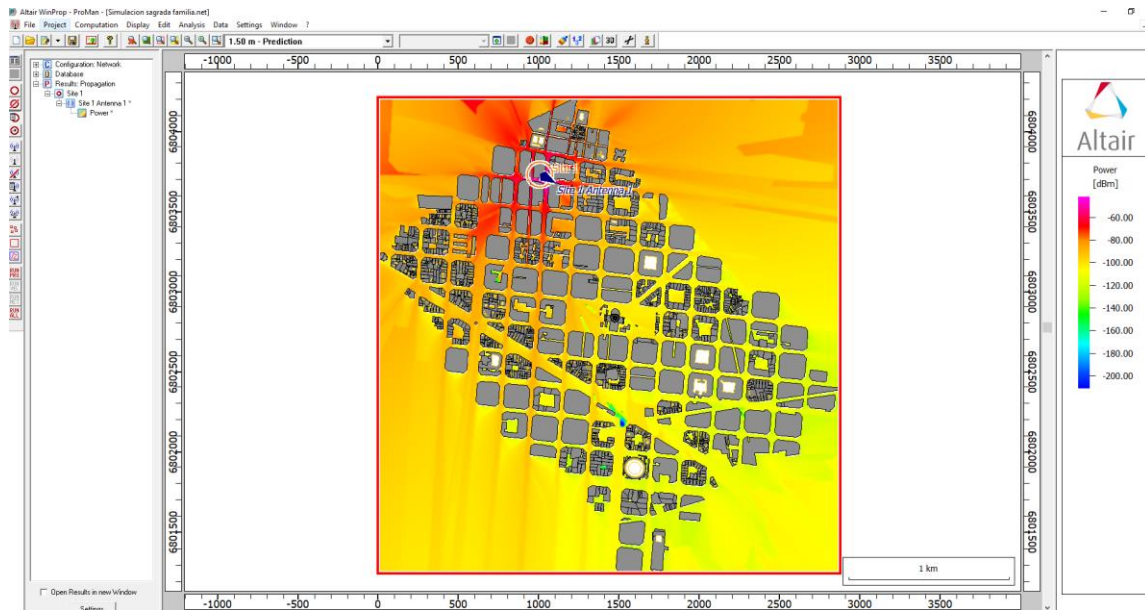


Figura 35: Resultado del nivel de potencia en imagen 2D.

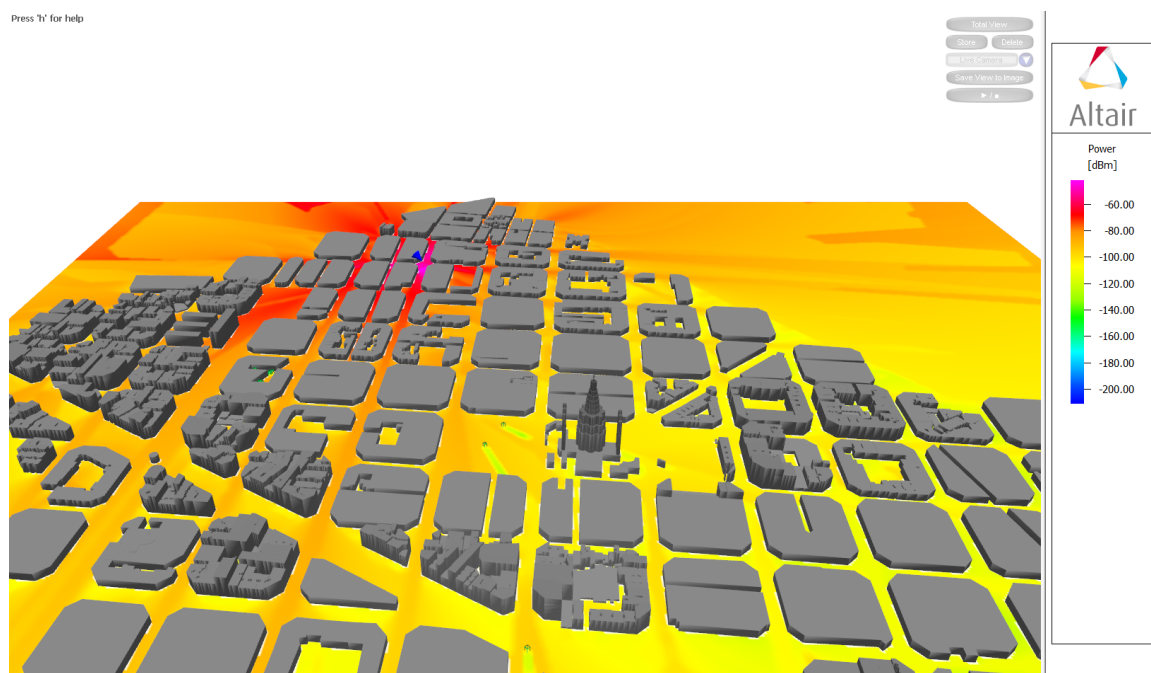


Figura 36: Resultado del nivel de potencia en imagen 3D.

Con la ayuda de la leyenda ubicada a la derecha de las Figuras 35 y 36, se puede identificar cual es el nivel de potencia que hay en cada punto de la zona especificada. Con esta información ya se puede realizar la planificación de la zona entera.

No se deben valorar los puntos situados en los límites de la zona ya que no son representativos. El programa cree que detrás del último edificio representado hay campo abierto, cosa que no es cierta, e incluso pinta una sombra para que se vea el bloqueo de la señal generado por el propio edificio.

El siguiente paso para poder seguir con la simulación se establece cuál es la potencia mínima que necesita el vehículo autónomo. Para ello se usará la siguiente expresión:

$$S = RT + NF + 10 * \log(BW) + SNR$$

Dónde:

S es la sensibilidad.

RT es el ruido térmico, -174 dBm/Hz. [55]

NF es el factor de ruido, 5 dB [56]

SNR es la relación señal a ruido, 16 dB para la modulación 64 QAM [57]

BW es el ancho de banda, 100 MHz. Tabla 4

Con estos datos se obtiene que la sensibilidad es -73 dBm. Por lo que se debe asegurar que en cualquier punto de la zona se reciban -73 dBm de potencia.

El software ofrece la opción Threshold, Figura 37, que permite ver con más claridad en que zona se cumple el requisito de la sensibilidad.

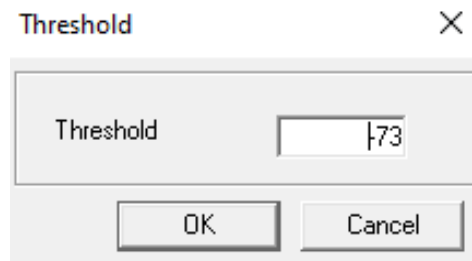


Figura 37: Se establece el Threshold.

Se obtiene el siguiente resultado Figura 38:



Figura 38: Resultado con la opción threshold activado.

En la Figura 39 se observa como indica el programa la orientación de antena.



Figura 39: Ubicación de la estación base y orientación de la antena

Se observa que es mucho más fácil distinguir en que puntos no se cumple la potencia mínima. El siguiente paso es realizar la planificación completa de la zona. Para ello, se seguirá el mismo proceso para la configuración de todas las bases.

5.2.2 Proceso secuencial de la cobertura conjunta a frecuencia sub 6GHz

Se marcarán diferentes edificios para ubicar las estaciones base y dependiendo de las necesidades, pueden existir modificaciones en la altura de los mástiles de las antenas en caso de un posible bloqueo de la señal por parte de un edificio cercano. Otra de las variaciones introducidas dependiendo del transmisor es el azimut o la inclinación. Dependiendo de la zona que se quiera cubrir, estas dos variables se deben adaptar a cada caso, pero siempre utilizando valores realistas. El objetivo es encontrar una configuración óptima con el mínimo número de antenas posibles, pero que cumplan sin problemas los requisitos mínimos.

Se debe tener en cuenta otros factores como por ejemplo la Ley de memoria histórica de los Edificios. En el escenario estudiado quizá lo más eficiente sería instalar una antena en lo alto de la Sagrada Familia para iluminar toda la zona, pero hay que tener en cuenta las regulaciones urbanísticas que puedan limitar o generar problemas en la instalación de las estaciones base en edificios históricos o protegidos. También es posible que comunidades de vecinos se nieguen a instalar dichas estaciones base por varios motivos. Por lo tanto, hay muchas variables a tener en cuenta cuando se hace el planteamiento de la distribución de las estaciones base.

Para la planificación de las estaciones base no existe una única solución, en este trabajo se propone la siguiente, Figura 40:

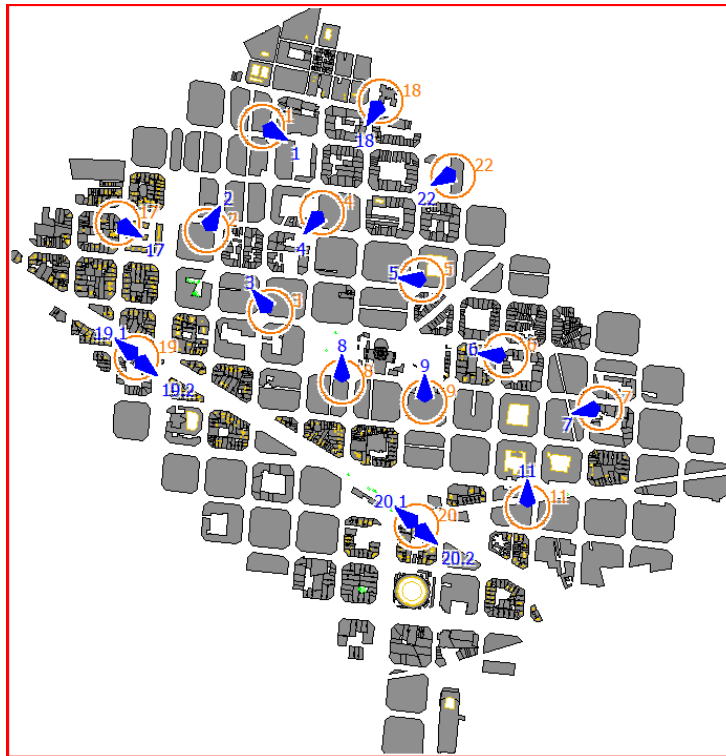


Figura 40: Posible opción de distribución de instalaciones base

Una vez hecha la configuración se indica al programa que realice todos los cálculos y se obtienen los resultados. Se puede visualizar los efectos de una sola estación base o el conjunto total, que es el resultado más interesante.

A continuación, se muestran los resultados Figuras 41, 42, 43 y 44:

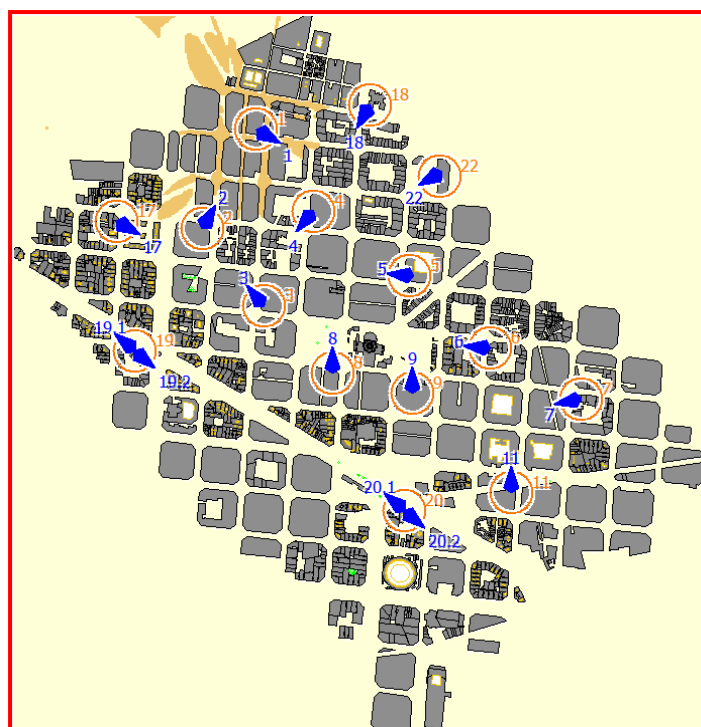


Figura 41: Contribución de la Antena 1.

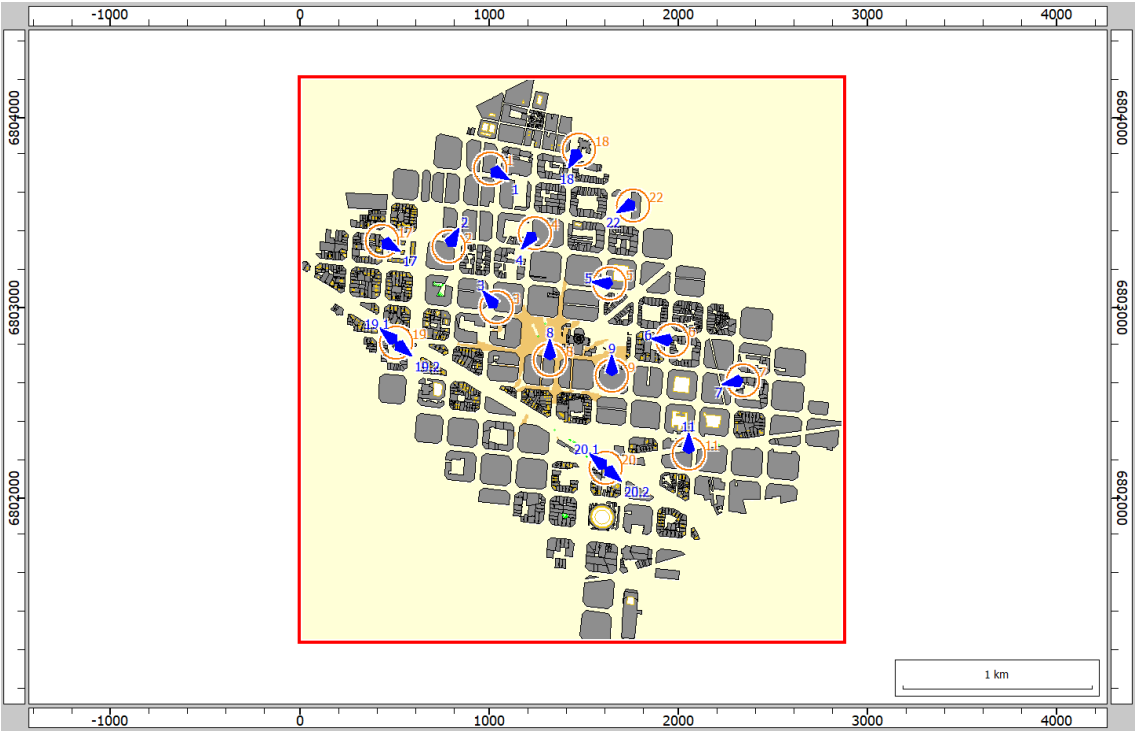


Figura 42: Contribución de la Antena 8.

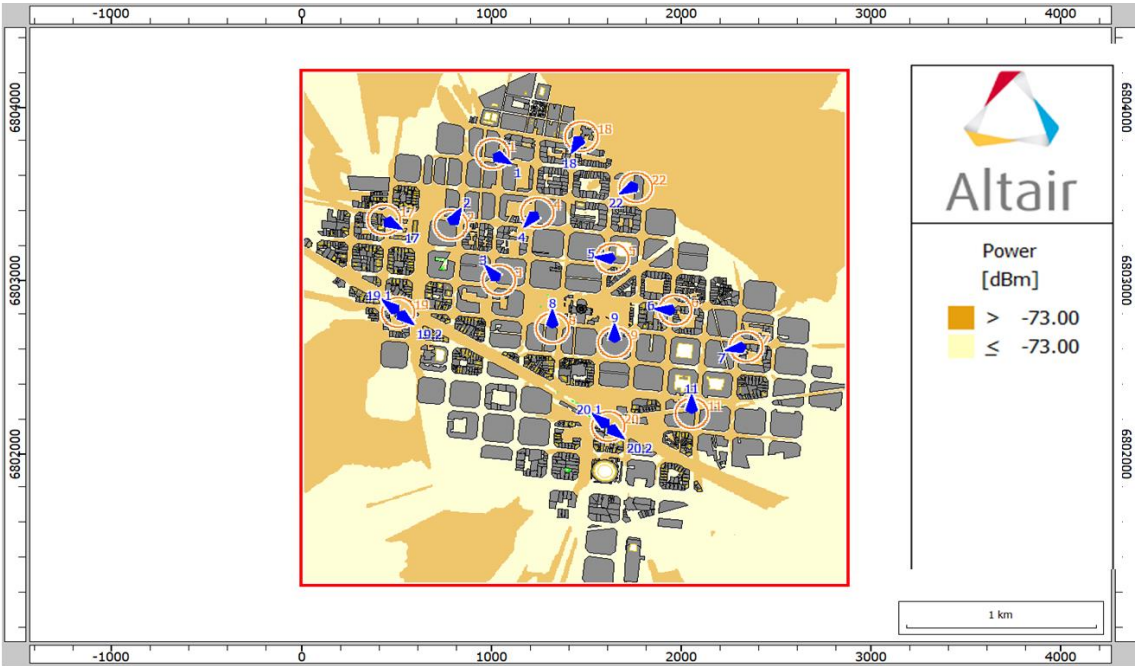


Figura 43: Contribución Total de todas las antenas.

Cabe mencionar que en determinadas zonas es interesante dedicar una estación base únicamente a una calle como podría ser el caso de la Avinguda Diagonal tal y como se muestra en la Figura 44.

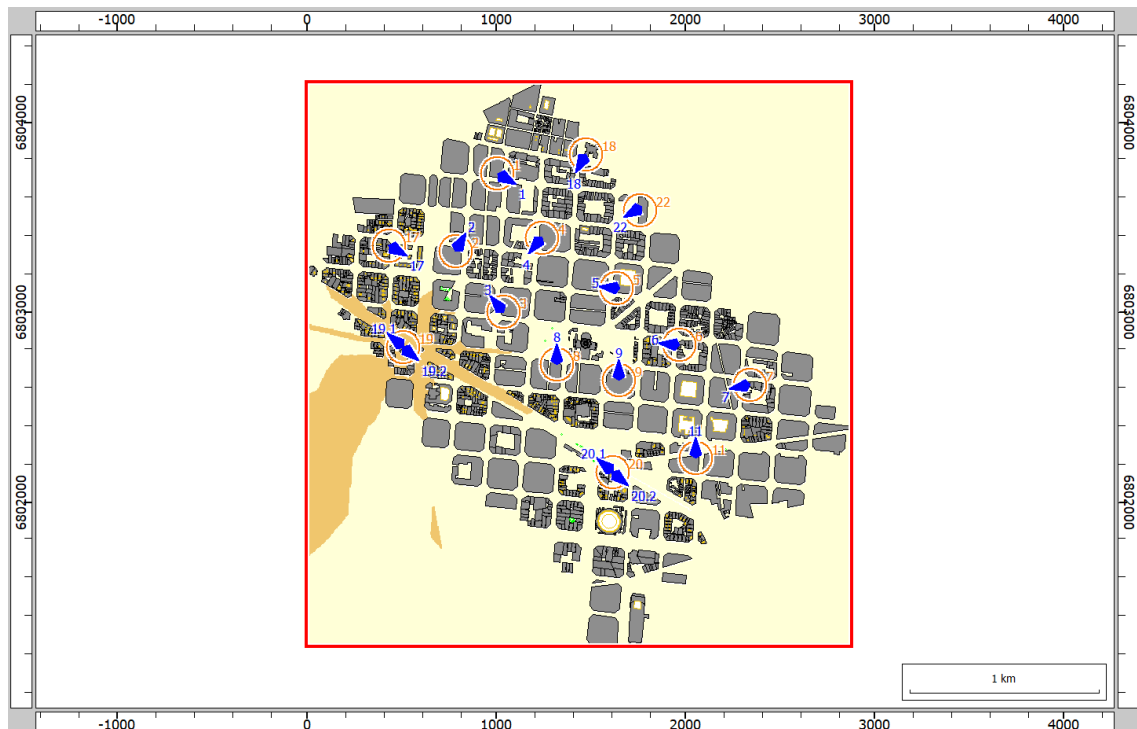


Figura 44: Contribución Antena 19. Avinguda diagonal.

Como se ha comentado anteriormente, en la Figura 43 solo se debe analizar las zonas interiores ya que las exteriores no son representativas de la realidad. Con esta configuración se observa que se cumplen los -73 dBm necesarios en toda la zona de estudio.

5.2.3 Proceso secuencial de la cobertura conjunta a frecuencia de 26GHz

A continuación, se realizará el mismo proceso para una estación base 5G en mmWave (milimétrical wave) a 26GHz para estudiar la viabilidad de usar esta frecuencia para la comunicación V2I.

La antena utilizada en este apartado tiene el siguiente diagrama de radiación Figura 45:

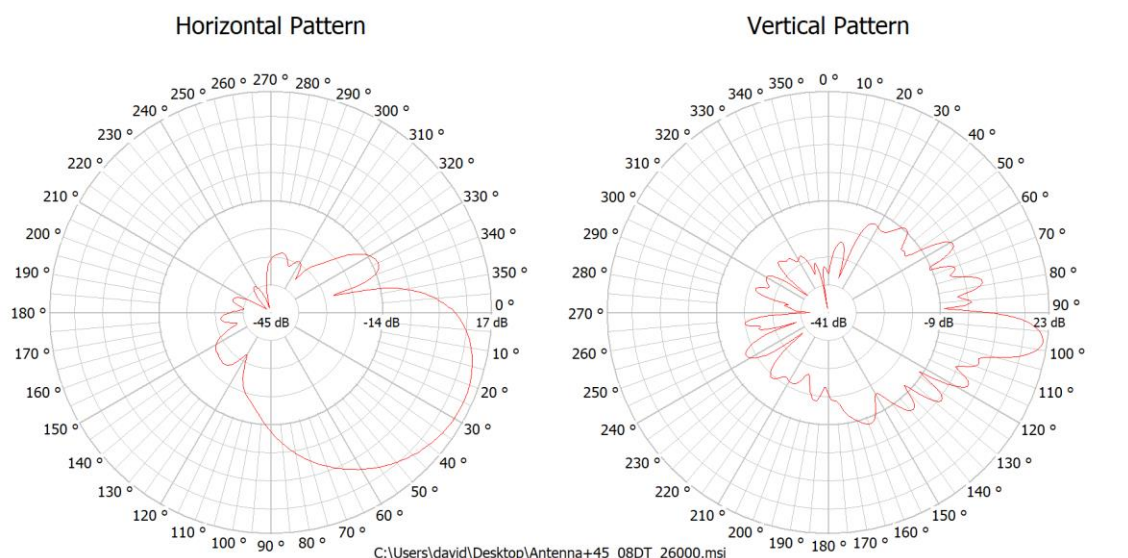


Figura 45: Patrón Estación Base a 26 GHz.

Una vez modificado el diagrama de radiación de cada una de las antenas situadas en la trama urbana seleccionada, se debe de modificar los valores de la celda Figura 46:

Cell

Number and Name of Cell in Project
Nr Name

Status of Cell in Project
☒ Enabled (Prediction computed)
☐ Disabled (Prediction not computed)

Location of Antenna
x / Longitude m
y / Latitude m
z / Height m
☒ Height relative (to ground)
☐ Height absolute (to sea level)

Transmitter Settings
Frequency (used for propagation) MHz
Tx Power ☐ W ☒ Output PA
☒ dBm ☐ EIRP ☐ ERP

Prediction Area (Cell)
Prediction area is identical for all cells/transmitters and defined on the simulation tab.

Antenna Pattern
☐ Omnidirectional (isotropic) antenna
☒ Directional / Sector antenna
Orientation
Azimuth ° Downtilt °
Antenna Pattern

Select Show
Gain of antenna: dBi

Measurements Polarization

OK Cancel

Figura 46: Características completas del transmisora 26GHz.

Una vez realizado el cambio en las estaciones base se obtiene el siguiente resultado de potencia Figuras 47 y 48:

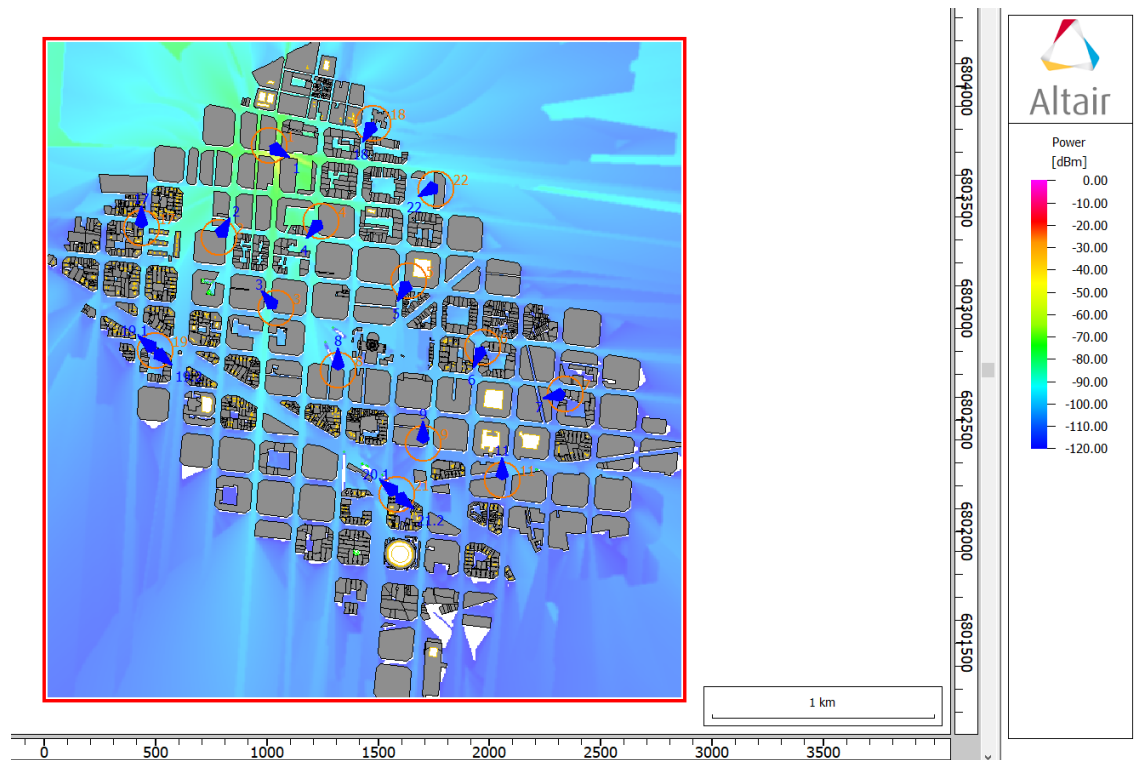


Figura 47: Resultado del nivel de potencia en imagen 2D de una estación base.

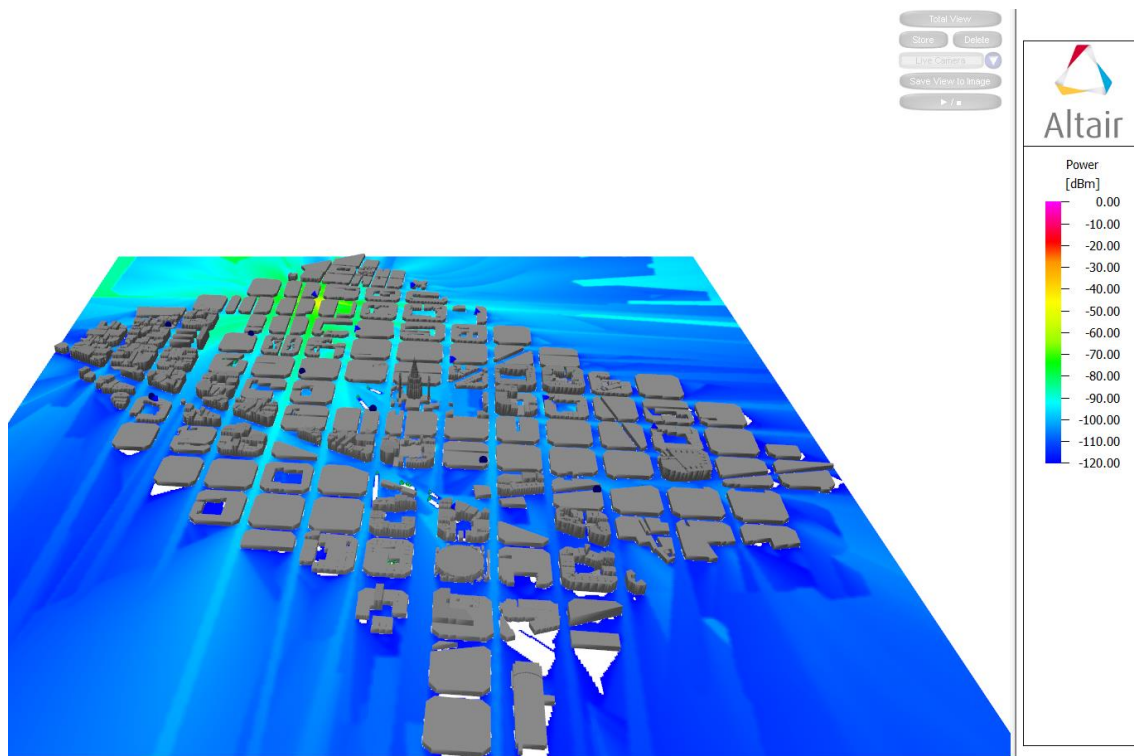


Figura 48: Resultado del nivel de potencia en imagen 3D de una estación base.

Como se ha indicado anteriormente, se debe calcular la sensibilidad que se debe tener el vehículo autónomo. Se utiliza la misma expresión:

$$S = RT + NF + 10 * \log(BW) + SNR$$

Dónde:

S es la sensibilidad.

RT es el ruido térmico, -174 dBm/Hz.

NF es el factor de ruido, 5 dB

SNR es la relación señal a ruido, 25 dB

BW es el ancho de banda, 400 MHz. Tabla 4

Con estos datos se obtiene que la sensibilidad es -57 dBm. Por lo que se debe asegurar que en cualquier punto de la zona se reciban -57 dBm de potencia. Se fija el nivel de Threshold que se ha obtenido de la expresión anterior para obtener el siguiente resultado Figura 49:

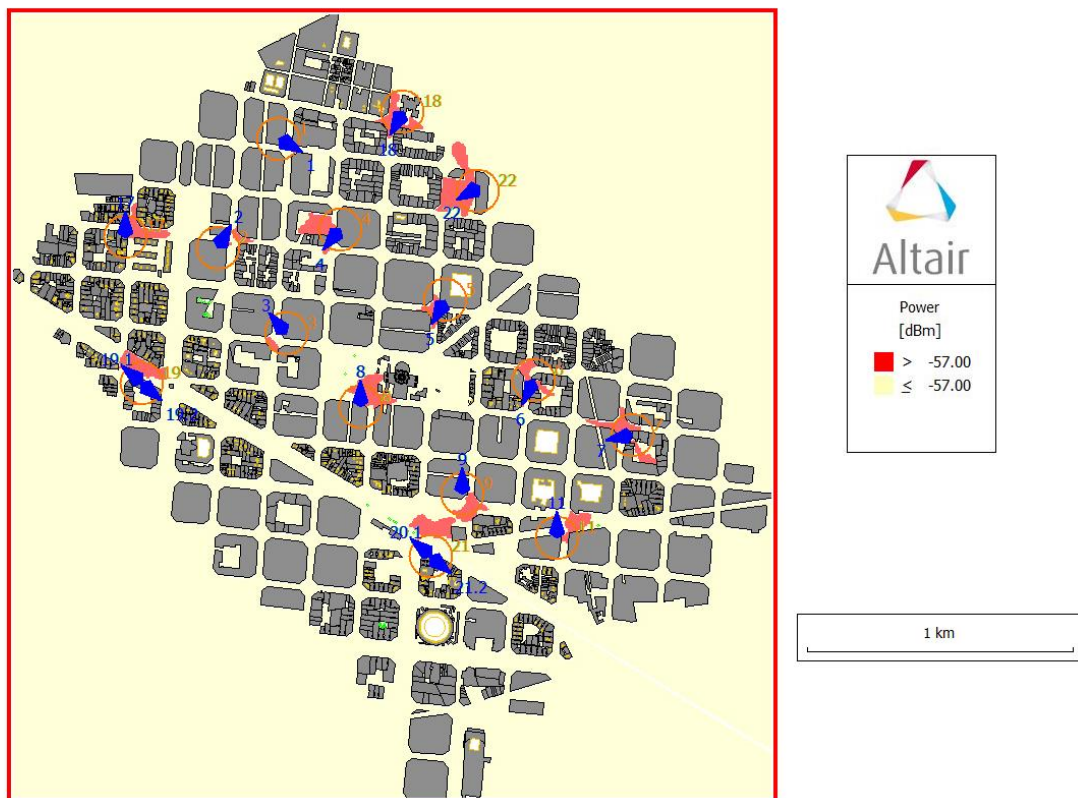


Figura 49: Contribución de todas las estaciones base a 26GHz.

5.2.4 Conclusiones iniciales

Tras realizar las simulaciones se llega a las siguientes conclusiones:

- A frecuencia sub 6Ghz se puede cubrir la trama urbana con una pequeña cantidad de antenas alimentadas a baja potencia.
- En las calles estrechas los rebotes de los rayos no penetran con facilidad. Por lo tanto, en las zonas de las ciudades donde las calles son estrechas es necesario un mayor número de estaciones base y orientarlas para obtener la máxima penetración. Por el contrario, en avenidas anchas como Avinguda Diagonal con una cantidad reducida de estaciones base es posible cubrirla por completo.
- En las zonas donde se encuentra una gran cantidad de vegetación como delante la Sagrada Familia, se generan zonas de sobra. Como se puede observar en la Figura 50.



Figura 50: Afectación vegetación sobre el nivel de potencia

- Las antenas de las estaciones base para ondas milimétricas se basan en “massive MIMO”, partiendo de antenas 2x2 pudiendo llegar incluso a 16x16 y algunas 64x64 que ofrece diagrama de radiación con multibeam y ofrecen la posibilidad de conectar gran cantidad de receptores.
- Al utilizar una frecuencia de trabajo elevada (>24GHz) todo obstáculo genera una atenuación elevada, por lo tanto, es necesaria un mayor número de estaciones base, aproximadamente una por cada cruce.
- La sensibilidad en los receptores es peor para frecuencias milimétricas comparado a cuando se trabaja a frecuencias sub 6GHz. Una de las causas es la necesidad un ancho de banda mayor si se compara con frecuencias sub 6GHz.
- Se llega a la conclusión que es más apropiado trabajar a frecuencia sub 6GHz para la implementación del vehículo autónomo en las ciudades con comunicaciones que no necesiten un gran ancho de banda.

6. DATOS 3D PARA LA MOVILIDAD AUTÓNOMA

En este capítulo se analizará en un primer punto la necesidad de usar datos 3D en la movilidad autónoma. A continuación, se calculará el volumen de datos que supone obtener en tiempo real una representación del mapa de la ciudad en 3D. Finalmente se explicará como una herramienta como el “Edge Computing” ayudará a gestionar esos datos.

6.1 Necesidad de datos 3D para la movilidad autónoma.

Como se ha comentado en capítulos anteriores, en la evolución de la autonomía del vehículo habrá un punto donde se requerirá una imagen 3D en tiempo real de lo que está sucediendo a en el entorno del vehículo.

Esa representación en tiempo real será necesaria para que el vehículo tome las decisiones oportunas durante la circulación, pero también puede ser útil para que el usuario que va dentro del vehículo pueda comprobar que se está dirigiendo a la dirección deseada, o como está la previsión del tráfico y tener así una estimación de cuánto va a durar el trayecto.

En la imagen inferior Figura 51 se puede observar la simulación de un prototipo de vehículo autónomo realizado por la empresa Ficosa Internacional y presentado en el Mobile World Congress de Barcelona del pasado año 2019.



Figura 51: Imagen obtenida de la simulación de Ficosa en el MWC de 2019 [58].

En la Figura 51 se puede observar como en el panel de control de vehículo hay una representación 3D en tiempo real del vehículo y su entorno. En esa representación se puede observar detalles como por ejemplo la necesidad de cambiar de carril debido a que otro vehículo está averiado. También se observa la existencia de una bicicleta en el ángulo ciego derecho del conductor o la presencia de una persona oculta detrás del vehículo averiado en disposición de cruzar la calle.

El panel de control ubicado en frente de la posición del conductor informa al pasajero de que el vehículo se va a detener porque, incluso sin tener línea visual de la persona que quiere cruzar la calle, sabe que está allí.

Este ejemplo es una situación cotidiana que muestra la necesidad del uso de datos 3D en tiempo real, no exclusivamente para el vehículo, sino para que el usuario este informado de porque su vehículo se va a detener o porque va a cambiar de carril.

Otras situaciones analizadas en esa simulación son la presencia de una ambulancia o en la entrada a la Ronda Litoral de la ciudad de Barcelona. En el primer caso, Figura 52, se observa cómo se informa de la presencia de una ambulancia tanto en el panel de control como en el mapa 3D y a continuación el vehículo cambia de carril para dejar espacio libre a la ambulancia.



Figura 52: Imagen obtenida de la simulación de Ficosa en el MWC de 2019.

Finalmente, en el caso de la entrada a la Ronda Litoral la simulación da un ejemplo de circulación cooperativa haciendo que los demás coches reduzcan su velocidad de manera preventiva para que se pueda realizar la incorporación a la vía con total seguridad.

6.2 Volumen de datos 3D para la movilidad autónoma.

6.2.1 Volumen de datos para un único vehículo autónomo

En el apartado anterior se ha analizado la necesidad de tener imágenes 3D en tiempo real para la movilidad autónoma. A continuación, se realizará el cálculo del volumen total de datos 3D a gestionar.

Cada minuto de grabación a una calidad de 1080p HD a 60 fps (frames por segundo) tiene un peso de 300 Mb (Megabytes). Esto equivale a que cada imagen 2D tiene un peso de 5 Mb. Para poder realizar una imagen 3D se requiere un mínimo de 3 imágenes tomadas desde posiciones distintas en el mismo instante de tiempo, por lo que se puede concluir que una imagen 3D tiene un peso aproximado de 15 Mb [59].

Si se considera que el vehículo mostrará la imagen 3D al usuario a 30 fps se obtiene que cada segundo de imagen 3D en tiempo real tiene un peso de 450 Mbps para un único vehículo autónomo.

6.2.2 Extrapolación al tráfico habitual en una trama urbana concurrida

Aplicando los resultados anteriores, si se analiza un cruce de una ciudad donde pueda haber 30 vehículos, esto implica que para que todos los vehículos tengan a su disposición una imagen 3D en tiempo real son necesarios 13,5 Gbps.

Este resultado de 13,5 Gbps es solo para un cruce con 30 vehículos. Si extrapolamos este dato junto con la predicción hecha en capítulos anteriores de la penetración del vehículo autónomo en España se obtienen los siguientes resultados Figura: 53.

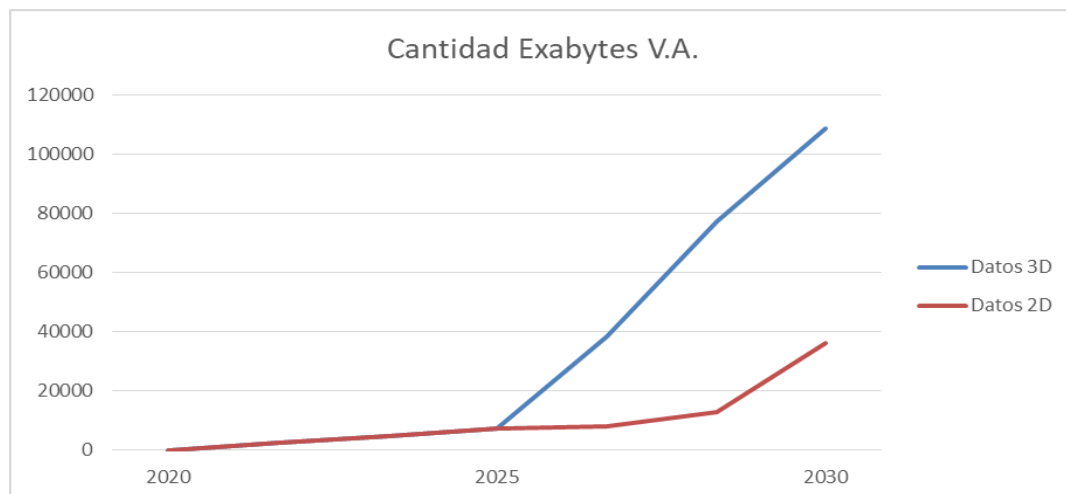


Figura 53: Cantidad de Exabytes generados en un mes con datos 3D y 2D.

Analizando la gráfica Figura 53 se observa que, a partir de 2025, que es cuando se prevé que la implementación del vehículo autónomo empiece a ser una realidad, la cantidad de tráfico de datos para únicamente imagen 3D se dispara. También se estudia la posibilidad de que todas las imágenes usadas sean en 2D, y aun así, el volumen del tráfico de datos es muy elevado.

Este resultado es incluso más alarmante si se compara con las predicciones que hace Cisco del tráfico de datos a nivel mundial, Figura 54 [60].

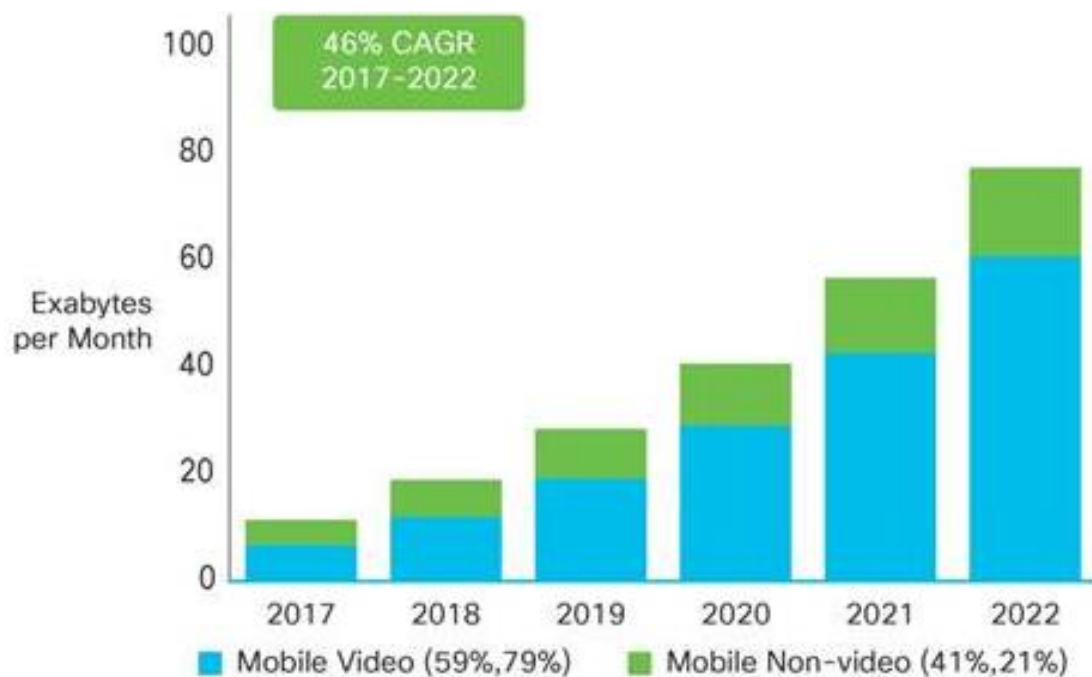


Figura 54: Predicción Cisco de la cantidad de Exabytes generados en el mundo en un mes [60].

Mientras que en 2026 Cisco prevé que se podrían llegar a los 100 Exabytes al mes en todo el mundo, en estos datos no están incluidos los datos del vehículo autónomo. Los datos 3D del vehículo autónomo en 2026 implicarán 20.000 Exabytes al mes.

Si se analiza el caso en España la diferencia entre el tráfico de datos con o sin 3D es un aumento de aproximadamente un 3.000% en 2025 y un 6.500% en 2030 como se puede observar en la Figura 55.

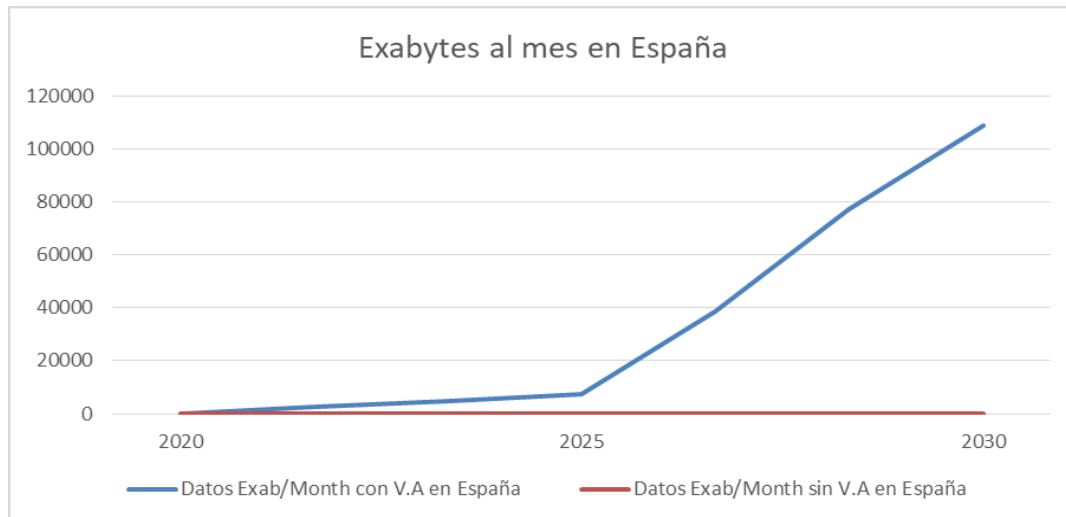


Figura 55: Cantidad de Exabytes generados en un mes con y sin vehículos autónomos en España.

Es evidente que con los métodos actuales de gestión de datos resulta inviable absorber el crecimiento exponencial que suponen los datos 3D para la movilidad autónoma. Se deben buscar nuevas metodologías para la gestión de datos.

6.3 Gestión del volumen de datos 3D para la movilidad autónoma. “Edge Computing”.

En este punto se estudiará que es “Edge Computing”, que estructura tiene y cómo puede el “Edge Computing” ayudar a la gestión del volumen de datos 3D para la movilidad autónoma.

6.3.1 Definición del “Edge Computing”.

Uno de los métodos propuesto para solucionar la gestión del gran volumen de datos 3D se denomina “Edge Computing”. Esta técnica consiste en tratar que el procesamiento de los datos se realice a nivel local o cerca de donde se generan los datos y que de esta manera no se tenga que enviar toda la información al “Cloud” global, donde todos los vehículos autónomos envían los datos. De este modo se ayuda a reducir el volumen de tráfico que se envía a través de una red con muchos usuarios y evitar posibles cuellos de botella [61].

En este tipo de configuraciones los analizadores de datos locales deben tener la capacidad de almacenamiento, computación y conectividad necesarios para analizar los datos, realizar las acciones oportunas con ellos y enviar únicamente los datos necesarios al “Cloud” [62].

La cercanía entre el dispositivo generador de datos y el elemento que debe gestionarlos ayuda a obtener una menor latencia y poder procesar los datos en tiempo real. Esta técnica también mejora la conectividad y la velocidad de transmisión de datos de los vehículos autónomos con la infraestructura y del vehículo autónomo con otros vehículos autónomos.

6.3.2 Estructura del “Edge Computing”.

La técnica del “Edge Computing” sigue una estructura piramidal como la que se puede observar en la Figura 56:

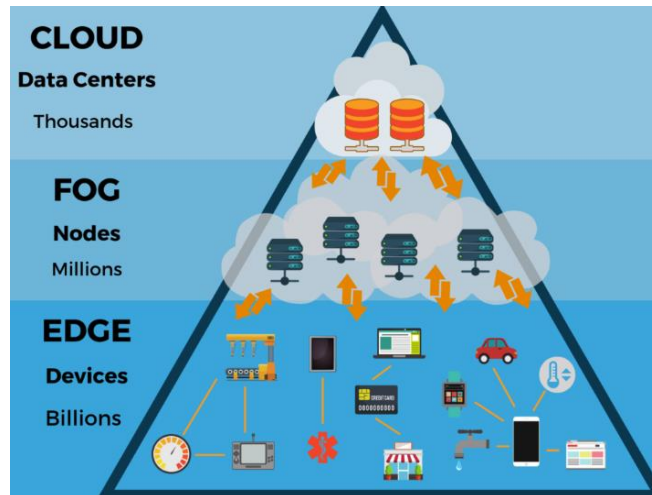


Figura 56:Estructura piramidal del “Edge Computing” [62].

En la base de la estructura piramidal es donde se encuentran todos los dispositivos IoT (Internet of Things). En este trabajo se estudia el “Edge Computing” aplicado a los vehículos autónomos, pero se trata de una técnica aplicable a muchos otros ámbitos de IoT [63].

En el caso aplicado a los vehículos autónomos, en la base de la pirámide del “Edge Computing” se encuentran los vehículos, ya que son los grandes generadores de información. Pueden generar datos mediante la sensorización del propio vehículo con las señales que recibe de otros vehículos e infraestructuras o bien generar sus propios datos con la toma de decisiones que hace el propio vehículo durante la circulación, como por ejemplo la decisión de cambiar de carril [64].

En el segundo nivel de la pirámide se encuentra el elemento clave de esta técnica, denominado “Fog” (Niebla) en la Figura 56. En la niebla es donde se encuentran los dispositivos que gestionan los datos. Estos dispositivos son los encargados de recibir los datos de todos los vehículos de su zona, analizar la información, realizar la toma de decisiones y responder al vehículo indicándole que acción debe realizar. Finalmente debe enviar la información más relevante al “Cloud” [64].

En la parte más alta de la pirámide hay el “Cloud”. El objetivo es que reciba únicamente los datos más relevantes y de esta manera no saturarlo con información repetida o no relevante.

6.3.3 Ejemplo de la aplicación de “Edge Computing”

Un ejemplo práctico para que se entienda bien el funcionamiento podría ser el siguiente:

Por ejemplo, si en una calle se ha averiado un vehículo, tanto el propio vehículo averiado como los que se encuentran a su alrededor se comunican y envían múltiples mensajes repetidos a los dispositivos ubicados en la niebla de que existe esta incidencia.

El dispositivo ubicado en la niebla es el encargado de recibir todos los mensajes, indicar a todos los vehículos que se encuentran en su radio de actuación que hagan otra ruta para evitar la retención y finalmente enviar un único mensaje al “Cloud” informando de la incidencia.

El “Cloud” será el encargado de comunicar a todos los nodos intermedios ubicados en la niebla que indiquen a cada vehículo de su zona una ruta alternativa para evitar retención.

7. COMUNICACIONES PARA LA MOVILIDAD AUTONOMA

En este capítulo se estudiarán los tipos de datos necesarios para la comunicación en los vehículos autónomos. En un primer punto se hablará sobre los tres tipos de datos que serán enviados y recibidos por los vehículos autónomos. A continuación, se realizará un estudio sobre el volumen de datos generados de cada tipo. Para finalizar se calculará el volumen de datos y el ancho de banda necesario para cada tipo.

7.1 Tipos de datos utilizados en los vehículos autónomos.

Cuando se analizan los datos necesarios para la implementación del vehículo autónomo, se pueden separar en tres tipos:

- Datos 3D para la movilidad autónoma.
- Datos para la comunicación del vehículo autónomo y su entorno: son los datos necesarios para la comunicación del vehículo con todo lo que le rodea.
- Datos de entretenimiento: datos que se usarán en el tiempo que se está dentro del vehículo para acciones no relacionadas con la conducción.

7.1.1 Datos 3D para la movilidad autónoma

En el capítulo anterior, Gestión de los datos 3D para la movilidad autónoma se trata a fondo la necesidad de la utilización de los datos 3D y se ha calculado el volumen necesario de ellos. Se ha llegado a la conclusión que un vehículo necesita recibir un total de 450Mbps para generarse la imagen 3D de la zona colindante a donde se encuentra. Por lo tanto, es necesaria la implementación de una red 5G gracias a su latencia y velocidad de transmisión de los datos.

7.1.2 Datos para la comunicación del vehículo autónomo y su entorno

En la Figura 57 se observan todos los tipos mensajes que serán necesarios, también se pueden observar lo explicado en el capítulo anterior. La existencia de un modelado 3D con la información del entorno del vehículo.



Figura 57: Resumen conectividad [65].

Como se observa en la imagen, estos mensajes se pueden separar en 4 categorías [66]:

- Mensajes del vehículo a los pasajeros: el vehículo informará a los pasajeros de informaciones que puedan ser de su interés. Estos mensajes no son transmitidos al resto de usuarios de la vía.
- Mensajes entre el vehículo y la infraestructura (V2I/I2V) estos mensajes han de ser bidireccionales, la infraestructura debe de comunicarse con el vehículo para aportarle el mapa con la información sobre su entorno y el vehículo debe transmitir lo captado por sus sensores hacia las estaciones base.
- Mensajes entre vehículos (V2V) estos mensajes aportan información sobre el vehículo transmisor. Estos mensajes son transmitidos punto a multipunto, de un vehículo hacia el resto de vehículos que se encuentran en su entorno.
- Mensajes del vehículo autónomo a los peatones (V2P) estos mensajes hacia al resto de dispositivos que se encuentren en la vía como por ejemplo viandantes o edificios.

Una vez detectados los mensajes y la comunicación de los vehículos se procede a analizarlos por separado.

7.1.2.1 Comunicación entre el vehículo autónomo y los pasajeros

Los mensajes de vehículo a pasajeros informan a los ocupantes del vehículo mediante las pantallas y los altavoces que dispone el mismo.

Estos mensajes se mostrarán indicando si son mensajes críticos y obligan al vehículo a detenerse o en cambio, es posible seguir circulando aunque existe la necesidad de realizar acciones sobre el vehículo.

7.1.2.2 Comunicación entre los vehículos y la infraestructura (V2I/I2V)

Para estudiar estos mensajes, se separarán en mensajes vehículo-infraestructura e infraestructura-vehículo. Para la comunicación entre ambos dispositivos se utilizará la tecnología 5G en frecuencia sub 6GHz, se ha llegado a esta conclusión mediante los resultados obtenidos en la simulación del capítulo 5.

Primero se hablará sobre los mensajes del vehículo a la infraestructura, estos mensajes son enviados por vehículos hacia las estaciones base. Los mensajes dispondrán de la siguiente información, Figura 58 [67]:

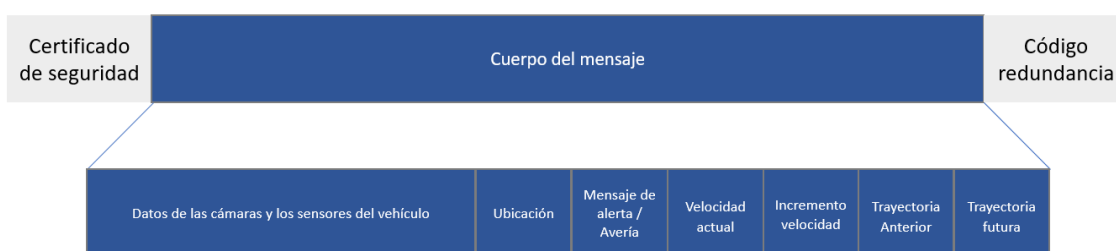


Figura 58: Estructura mensaje V2I

Por otro lado, los mensajes enviados por las estaciones base hacia los vehículos (I2V) son, Figura 59 [68]:

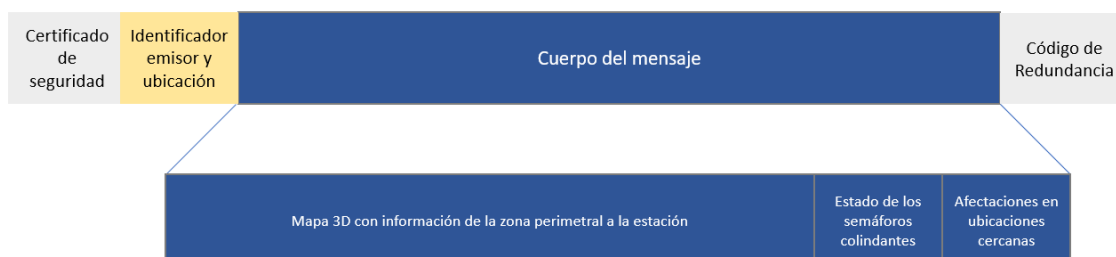


Figura 59: Estructura mensajes I2V

Estos mensajes son enviados hacia todos los vehículos en rango de cobertura.

7.1.2.3 Comunicación entre vehículos (V2V)

Los mensajes V2V son enviados mediante ITS-G5, de esta manera se añadirá redundancia a toda la información que detectan los sensores y la información que se recibe de la red, se ha llegado a esta conclusión teniendo en cuenta los datos obtenidos en el capítulo sobre tecnologías de comunicación aplicadas al vehículo autónomo [69].

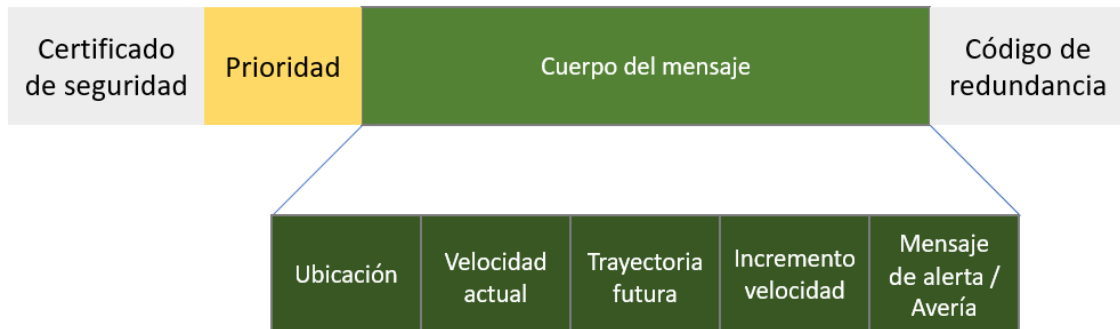


Figura 60: Estructura mensajes V2V

7.1.2.4 Comunicación del vehículo en casos de emergencia a los peatones (V2P)

El vehículo enviara información al entorno solamente en casos de emergencia la cual sea necesario informar a estos, de esta manera los vehículos funcionarán como un puente, añadiendo redundancia y veracidad a la información [70].

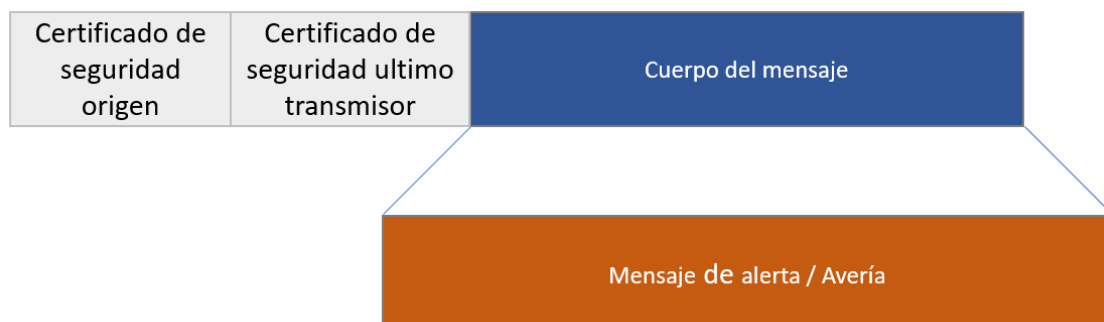


Figura 61: Estructura mensaje V2P

7.1.3 Mensajes para el entretenimiento.

Una vez implementado el vehículo autónomo, los pasajeros ya no deberán estar atentos a la carretera ni a su entorno. Esto implica que las horas que actualmente se destinan a controlar el vehículo se pueden utilizar para diferentes ámbitos. Hay vehículos como el estudiado en el apartado de prototipos que están habilitados para dormir, estos tienen el inconveniente de tener la capacidad para una o dos personas, pero si se utiliza la distribución actual de los vehículos, los ocupantes pueden realizar acciones de valor como podría ser trabajar con un ordenador o teléfono y/o entretenerse.

Algunas de las formas de entretenimiento, pueden ser acciones como: leer un libro, la visualización de una serie, jugar a videojuegos, etc. Esto abre un gran mercado para las empresas de telecomunicaciones ya que se generará un tráfico muy elevado de datos [71]. Las tarifas de telefonía actuales contienen limitaciones de datos de alta velocidad. Por ejemplo, Movistar ofrece una tarifa de 45€/mes por un total de 20Gigas, si esta tarifa se utiliza para la visualización de una serie en alta calidad se consume aproximadamente 3Gb por hora y en calidad 4k un total de 7Gb/h [72]. Por lo tanto, con una tarifa habitual de teléfono se podría ver entre 3 y 7 horas de contenido.

Por otro lado, Google ha desarrollado una plataforma llamada Stadia [73] que da la posibilidad de que con una conexión a internet, una pantalla y un mando poder jugar a videojuegos debido que estos no se ejecutan en local sino en el "Cloud". Esto ofrece la posibilidad de no tener que cargar con una videoconsola o un ordenador, aunque por el contrario tiene un retardo de unos milisegundos entre que la persona realiza una acción y se ejecute en el "Cloud". El uso de Stadia implica un consumo de datos superior a 100Mb por minuto, que con una tarifa habitual de datos serían unos 200 minutos de juego [74] para la utilización de Stadia, es necesaria una conexión estable que ofrezca una velocidad mínima de 50Mbps simétricos, con las redes actuales 4G es bastante limitado y habría la posibilidad de tener interrupciones en el servicio.

La descarga de libros por otro lado no es ningún problema ya que un libro tiene un peso de alrededor de entre 1 y 2 Mb, esto no es ningún problema para las redes actuales.

7.2 Volumen de datos por segundo y ancho de banda necesarios para los vehículos autónomos.

En los siguientes apartados, se calculará el volumen de datos generados con la implementación del vehículo autónomo y el ancho de banda necesario para gestionar este volumen.

7.2.1 Volumen de datos para un único vehículo autónomo

En la Tabla 6 se muestra el volumen de datos necesarios para un vehículo autónomo, separando el volumen de datos según que tipo de comunicación se trata y a que están destinados estos datos.

	3D	Conducción	Entretenimiento
V2V	0	18Mbps [75]	0
V2I	450Mbps	0	2-10Mbps**
V2P	0	0-5Mbps*	0

Tabla 6: Volumen de datos para un único vehículo.

* Las comunicaciones V2P habitualmente son de 0Mbps, a pesar de ello cuando se reproduce un mensaje tiene un peso de alrededor de 5Mb que se comunicará 1 vez por segundo.

** Datos calculados para un vehículo con entre 1 y 5 personas realizando acciones diferentes.

Como se puede observar en la Figura 62, se llega a la misma conclusión: la tecnología 5G es necesaria para la transmisión del mapa 3D del entorno del vehículo. Para los datos destinados al entretenimiento, existe un valor umbral que permitiría el uso la tecnología 4G/LTE en algunas aplicaciones, pero en otras tendría cortes intermitentes. Por lo tanto, se llega a la conclusión que es necesario el uso de la tecnología 5G.

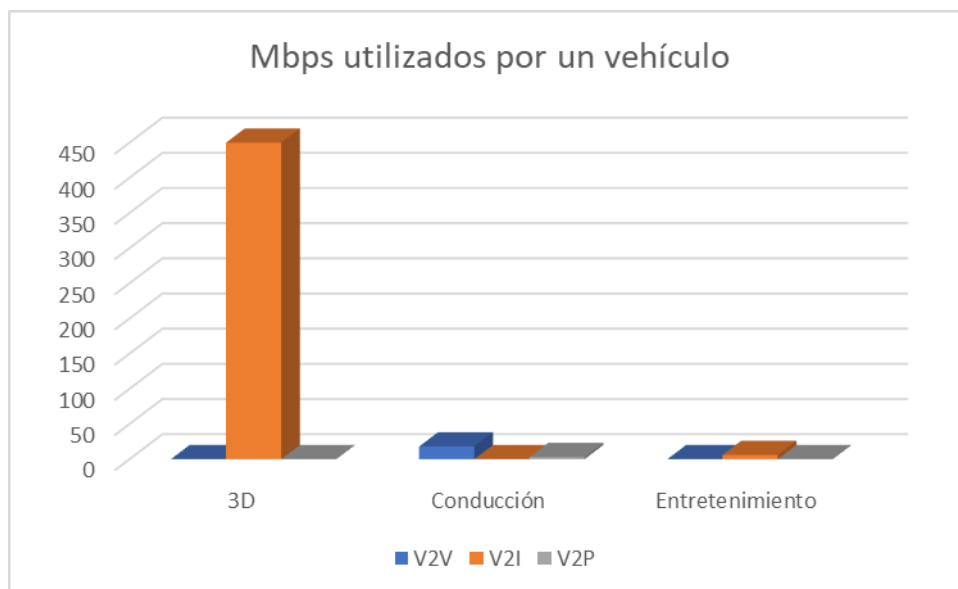


Figura 62: Cantidad de datos utilizados por un vehículo por segundo

7.2.2 Extrapolación para el tráfico habitual en una trama urbana concurrida

Si se extrapola la información adquirida en el apartado anterior, se obtiene la Tabla 7 que nos ofrece la cantidad de datos que serán necesarios por segundo para un cruce concurrido con 30 vehículos. En la figura 63 se observa los datos obtenidos en de manera gráfica.

	3D	Conducción	Entretenimiento
V2V	0	0.54Gbps	0
V2I	13.5Gbps	0	0.2Gbps
V2P	0	0-0.15Gbps	0

Tabla 7: Extrapolación de los datos para un cruce concurrido.

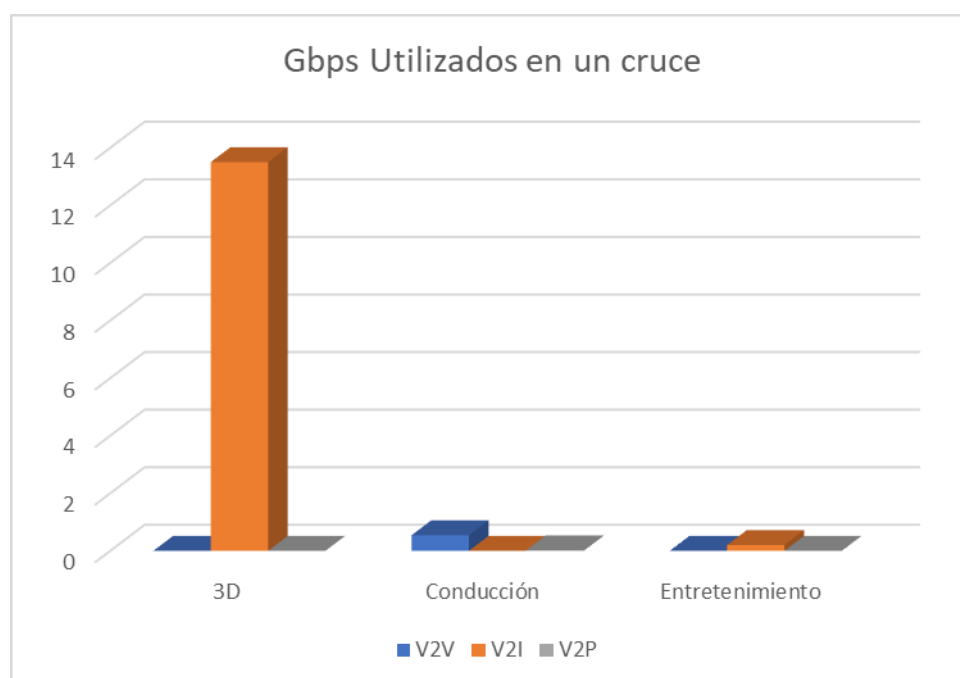


Figura 63: Cantidad de datos por segundo necesarios en una trama urbana concurrida

7.2.3 Ancho de banda necesario para el vehículo autónomo

Cuando se habla de la cantidad de datos utilizada por los vehículos también se debe contemplar el ancho de banda necesario ya que el espectro radioeléctrico es limitado y las empresas realizan una subasta para adquirir el mayor ancho de banda posible.

Una vez obtenidos los resultados del apartado anterior, es necesario encontrar la eficiencia espectral de estas tecnologías para poder calcular el ancho de banda necesario para operar.

Si LTE dispusiera de las características necesarias para poder ser utilizado para la transmisión de datos entre vehículos, con su eficiencia espectral 3bits/s/Hz [76] (bits / segundo / Hertzio) se obtendrán los resultados de la Tabla 8 mediante la siguiente expresión:

$$rb = \eta * BW \rightarrow BW = rb/\eta$$

Donde:

- rb =Velocidad de transmisión [bits/s]
- η = eficiencia espectral [bits/s/Hz]
- BW = ancho de banda [Hz]

	3D	Conducción	Entretenimiento	Total
V2V	0	6 MHz	0	6 MHz
V2I	150 MHz	0	2 MHz	152 MHz
V2P	0	1 MHz	0	1 MHz

Tabla 8: Ancho de banda necesario en 4G/LTE

Esto implica la necesidad de tener un ancho de banda útil para las transmisiones V2I de 152MHz que las empresas no disponen de él. En España las empresas en banda 4G disponen de anchos de banda de entre 30 y 40MHz [77]. Esto da una limitación extra para que el 4G/LTE no pueda ser utilizado para transmisión de datos V2I.

Por otro lado, si se calcula el ancho de banda necesario para 5G en banda sub 6GHz con una eficiencia espectral de 6bits/s/Hz [78] se obtendrán los resultados de la Tabla 9:

	3D	Conducción	Entretenimiento	Total
V2V	0	3 MHz	0	3 MHz
V2I	75MHz	0	1 MHz	76 MHz
V2P	0	0,5 MHz	0	0,5 MHz

Tabla 9: Ancho de banda necesario para tecnología 5G

Se obtienen unos valores que concuerdan con la información explicada en el capítulo 2. Las cuatro grandes empresas de telecomunicaciones de España, con el espectro adquirido en la subasta de 2019 de 3.4-3.8GHz, disponen del ancho de banda necesario para soportar estas comunicaciones.

8. Conclusiones

Una vez finalizado el estudio de las Infraestructuras Digitales para la Movilidad Urbana Conectada. Sistemas de Comunicaciones, sensores y gestión de los datos 3D para la movilidad autónoma, se llega a las siguientes conclusiones:

- Es necesario el uso de la tecnología inalámbrica 5G, en frecuencias sub 6GHz, para la implementación del vehículo autónomo debido a sus requisitos como son su baja latencia y su gran ancho de banda.
- La tecnología inalámbrica ITS-G5 puede ser útil para la comunicación V2V debido a que los vehículos se encuentran a una corta distancia. No es adecuada su utilización para el resto de comunicaciones V2X a causa de la gran saturación que tienen sus frecuencias de trabajo debido a ser una banda libre.
- Pese a la existencia de algunos prototipos de vehículos autónomos de uso privado de autonomías 4 y 5 se detecta que se encuentran en un estado inicial de desarrollo y que es necesaria su evolución. Por otro lado, en los vehículos autónomos destinados al servicio de transporte público, se encuentran diferentes modelos que funcionan correctamente como autobuses o metros. Se encuentran en un estado de desarrollo más avanzado gracias al interés y a las aportaciones monetarias de gobiernos o entidades públicas.
- El impacto socioeconómico del vehículo autónomo supondrá una gran inversión tanto por parte las entidades públicas como de las empresas de telecomunicaciones, así como para los fabricantes de los vehículos.
- Con la evolución de la penetración de la tecnología del vehículo autónomo se observa una clara mejora tanto en los niveles de contaminación como en la cantidad de accidentes. Se requerirá una especial atención en la seguridad frente a ciberataques debido a ser un punto crítico.
- La tecnología inalámbrica 5G en frecuencias milimétricas no es adecuada para la comunicación V2I debido a su corto alcance y su gran desvanecimiento. Esta tecnología puede ser utilizada para las comunicaciones V2V igual que ITS-G5, siempre y cuando se garantice la línea de visión directa entre los vehículos.
- El gran volumen de datos 3D necesarios para la movilidad autónoma supondrá la necesidad de utilizar mecanismos como "Edge Computing" para poder realizar una gestión óptima del volumen de datos generados y no saturar el "Cloud".

- Es muy importante que todos los vehículos dispongan de certificados de seguridad que garantizarán la legitimidad de todos los mensajes que se emitan a la red.
- Es necesario separar los mensajes según diferentes niveles de prioridad para mejorar la fluidez del tráfico y de esta manera mejorar los tiempos de actuación de los servicios de emergencias a la hora de desplazarse.
- La utilización de la tecnología 4G/LTE no es apropiada para la implementación del vehículo autónomo debido a que sería necesario un ancho de banda que las empresas de telecomunicaciones en España no disponen de él.

9. Referencias

- [1] Camino Kavanagh. (Agosto 2019) New Tech, New Threats, and New Governance Challenges: An Opportunity to Craft Smarter Responses? https://carnegieendowment.org/files/WP_Camino_Kavanagh_New_Tech_New_Threats1.pdf
- [2] Sistemas de Comunicaciones inalámbricas. <https://programarfacil.com/podcast/65-sistemas-de-comunicacion-inalambricas/>
- [3] Coches autónomos en la Unión Europea: de la ciencia ficción a la realidad. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20190110STO23102/coches-autonomos-en-la-ue-de-la-ciencia-ficcion-a-la-realidad>
- [4] Niveles de autonomía de los vehículos. <https://www.20minutos.es/noticia/2825372/0/clasificacion-coches-autonomos/>
- [5] Coches autónomos en la Unión Europea: de la ciencia ficción a la realidad. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20190110STO23102/coches-autonomos-en-la-ue-de-la-ciencia-ficcion-a-la-realidad>
- [6] Prototipo de Vehículo autónomo. Toyota. <https://www.xataka.com/inteligencia-artificial/toyota-presenta-su-prototipo-coche-autonomo-dotado-ia-para-mejorar-atencion-pasajeros-comunicarse-ellos>
- [7] Sistema Autopilot de Tesla. https://www.tesla.com/es_ES/autopilot
- [8] Prototipo de Vehículo autónomo. Volvo. <https://www.europapress.es/motor/coches-00640/noticia-volvo-presenta-nuevo-prototipo-coche-autonomo-viajar-seguro-conectado-futuro-20180905143912.html>
- [9] Lanzadera autónoma en Suecia. <https://www.autofutures.tv/2019/04/24/autonomous-mobility-launches-self-driving-shuttle-service-in-sweden/>
- [10] Prototipo de Lanzadera de la Generalitat de Catalunya. <https://www.catalannews.com/society-science/item/meet-erica-the-first-driverless-bus-in-catalonia>
- [11] Flota de taxis autónomos. Waymo. <https://waymo.com/>
- [12] Documentación a cerca de la Línea 9 y 10 de Barcelona. <https://www.tmb.cat/es/sobre-tmb/mejoras-red-transporte/metro-automatico/l9-sud>

[13] 5G y los vehículos autónomos.

<https://medium.com/datadriveninvestor/is-5g-friend-or-foe-for-autonomous-vehicle-72ee70800031>

[14] Características de la fibra óptica.

<https://www.fibraoptica hoy.com/fibra-optica-que-es-y-como-funciona/>

[15] Fibra óptica: Monomodo vs Multimodo.

<https://beyondtech.us/blogs/beyondtech-en-espanol/diferencias-entre-cables-de-fibra-optica-monomodo-y-multimodo>

[16] Commscope. Latencia en los sistemas de fibra óptica.

[https://www.commscope.com/Docs/Latency in optical fiber systems WP-111432-EN.pdf](https://www.commscope.com/Docs/Latency%20in%20optical%20fiber%20systems%20WP-111432-EN.pdf)

[17] Mejorar la latencia en los sistemas de fibra óptica.

<https://www.testdevelocidad.es/2016/08/18/la-latencia-podemos-mejorarla/>

[18] Wi-Fi Channels, Frequencies, Bands & Bandwidths.

<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/channels-frequencies-bands-bandwidth.php>

[19] Velocidades de las redes celulares.

<https://www.movilzona.es/2016/02/17/cual-es-la-velocidad-maxima-de-subida-y-descarga-en-2g-3g-y-4g/>

[20] Martha C. Paredes Paredes and M. Julia Fenandez-Getino García, Department of Signal Theory and Communications, Universidad Carlos III de Madrid. (Marzo 2015). The problema of Peak-to-Average Power Ratio on OFDM Systems.

<https://arxiv.org/pdf/1503.08271.pdf>

[21] Velocidades de las redes celulares.

<https://www.movilzona.es/2016/02/17/cual-es-la-velocidad-maxima-de-subida-y-descarga-en-2g-3g-y-4g/>

[22] 5G vs 4G.

<https://www.xataka.com/basics/que-5g-que-diferencias-tiene-4g>

[23] 5G en la conducción autónoma.

<https://newsroom.intel.la/news-releases/5g-la-conexion-la-conduccion-autonoma/#gs.no6pq0>.

[24] Necesidad de 5G en los coches autónomos.

<https://www.t-systemsblog.es/coches-autonomos-redes-5g-realidad/>

[25] Christophe Grangeat, 5G & SC Architecture Solutions. (Abril 2019). On the road to 5G. Use cases, Technology & EMF standardization.

<https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expacement/workshop-5G/20190417-Workshop-ANFR-NOKIA-presentation.pdf>

- [26] GSMA. (Julio 2019). Espectro 5G
<https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/10/5G-Spectrum-Positions-SPA.pdf>
- [27] Aplicaciones del 5G.
<https://www.etsi.org/technologies/5g>
- [28] Mario García Lozano. (2019). LTE and NB-IoT technologies, a brief introduction.
https://atenea.upc.edu/pluginfile.php/2991900/mod_resource/content/1/STCSC
- [29] G5 Intelligent Transport Systems (ITS); ETSI EN 302 663 V1.3.0 (2019-05)
https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.03.00_20/en_302663v010300a.pdf
- [30] EEUU, 5G or G5
https://www.hispanidad.com/confidencial/eeuu-apuesta-por-nokia-como-alternativa-a-huawei-en-5g_12013703_102.html
- [31] La UE apuesta por el G5 en los vehículos autónomos.
<https://www.lavanguardia.com/tecnologia/20190425/461840472591/coches-wifi-5g-union-europea.html>
- [32] Huawei y la tecnología 5G
<https://www.highmotor.com/huawei-utiliza-tecnologia-5g-desarrollar-radares-coches-autonomos.html>
- [33] 5GAA. (Abril 2018) Coexistence of C-V2X and ITS-5G at 5.9 GHz
<http://5gaa.org/wp-content/uploads/2018/10/Position-Paper-ITG5.pdf>
- [34] Sandra Rohrbach. (2019). How Cars should talk: 5G versus Wi-Fi
<https://www.telekom.com/en/company/details/how-cars-should-talk-5g-versus-wifi-575026>
- [35] Ubicación y funcionalidad de las cámaras de tráfico según la Dirección General de Tráfico.
<http://www.dgt.es/es/el-trafico/camaras-de-trafico/>
- [36] Inteligencia artificial en la conducción autónoma.
<https://blogthinkbig.com/la-inteligencia-artificial-llega-a-viena-semaforos-inteligentes>
- [37] Prototipo de vehículos autónomos. Seat.
<https://carnovo.com/es/guias/patinete-seat-cristobal-5g/>
- [38] Características de la autonomía en los vehículos de Mercedes.
<https://www.mercedes-benz.es/passengercars/content-pool/tool-pages>

[39] Niveles de autonomía de los vehículos.

<https://www.businesswire.com/news/home/20191111005467/en/Global-Autonomous-Cars-Market-2025-Level-Autonomy>

[40] Advanced antenna systems for 5G networks

<https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/advanced-antenna-systems-for-5g-networks>

[41] Penetración de los vehículos autónomos.

<https://www.forbes.com/sites/johnkoetsier/2019/04/06/self-driving-cars-in-10-years-eu-expects-fully-automated-cars-by-2030/#2502e11d615b>

[42] Renovación de la flota de vehículos.

<https://es.motor1.com/news/297295/antiguedad-coches-conductores-europa/>

[43] El fin de los motores de combustión en 2050.

<https://www.carsales.com.au/editorial/details/combustion-engine-dead-by-2050-says-bmw-121736/>

[44] The road to autonomous driving.

<https://www.te.com/global-en/industries/automotive/insights/connected-car-2.html>

[45] Regulación Madrid Central.

<https://www.autobild.es/especiales/madrid-central>

[46] Regulación Barcelona ZBE.

<https://www.elperiodico.com/es/barcelona/20200101/zbe-zona-bajas-emisiones-barcelona-empieza-2-enero-7637869>

[47] Motores gasolina y diésel en 2040.

https://www.abc.es/sociedad/abci-gobierno-prohibira-matriculacion-y-venta-coches-gasolina-y-diesel-partir-2040-201811131224_noticia.html

[48] Safety vs Security.

<http://planetrams.iusiani.ulpgc.es/wp-content/uploads/2018/03/SAFETYSECURITY.pdf>

[49] Los vehículos autónomos y la seguridad vial.

<https://www.headstuff.org/topical/will-self-driving-cars/>

[50] Los vehículos autónomos y la seguridad vial.

<https://www.lavanguardia.com/motor/actualidad/20181130/453239114130/coche-autonomo-mayor-seguridad-vial.html>

[51] Mani Amoozadeh , Arun Raghuram , Chen-Nee Chuah , Dipak Ghosal H. Michael Zhang , Jeff Rowe , Karl Levitt (2015). Security Vulnerabilities of Connected Vehicles Streams and their Impact on Cooperative Driving

<https://escholarship.org/content/qt43s8d4sx/qt43s8d4sx.pdf>

- [52] Evolución de la seguridad en los vehículos autónomos.
<https://www.innovaspain.com/seguridad-coches-autonomos-csic/>
- [53] Commscope Antenna VVSSP-360S-F
https://www.commscope.com/catalog/antennas/product_details.aspx?id=69448
- [54] Datos necesarios para los cálculos de la sensibilidad en celdas 5G
<http://www.techplayon.com/lte-reference-sensitivity-calculation-how-it-depends-on-snr-why-throughput-decrease-at-the-cell-edge/>
- [55] Elena Peralta, Toni Levanen, Tero Ihalainen, Sari Nielsen, Man Hung Ng, Markku Renfors y Mikko Valkama (Agosto 2018) 5G New Radio Base-Station Sensitivity and Performance
https://www.researchgate.net/publication/328399848_5G_New_Radio_Base-Station_Sensitivity_and_Performance
- [56] Ratio señal ruido para las diferentes modulaciones
https://www.researchgate.net/figure/Downlink-SNR-values-and-modulation-scheme-mapping-for-LTE_tbl1_257877900
- [57] Frecuencias Ondas milimétricas
https://www.skyworksinc.com/-/media/SkyWorks/Documents/Articles/IWPC_062019.pdf
- [58] Consultora Ficosá
<https://www.ficosa.com/es/>
- [59] Peso grabación
<http://eju.tv/2015/09/cuanto-ocupa-un-minuto-de-video-grabado-en-4k-con-los-nuevos-iphones/>
- [60] Cisco Visual Networking (Febrero 2019) Global Mobile Data Traffic Forecast
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>
- [61] Edge computing y 5G
<https://www.networkworld.es/convergencia/probado-con-exito-el-trabajo-con-edge-computing-mediante-5g>
- [62] Edge computing
<https://www.xataka.com/internet-of-things/edge-computing-que-es-y-por-que-hay-gente-que-piensa-que-es-el-futuro>
- [63] Edge computing
<https://www.muycomputerpro.com/2019/06/10/edge-computing-casi-todo-lo-que-tienes-que-saber>
- [64] Edge computing
<https://www.ionos.es/digitalguide/servidores/know-how/edge-computing/>

[65] Joshué Pérez (2019) comunicación entre vehículos autónomos en tiempo real, para maniobras de alto riesgo.

<https://intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXIX/pdf/303.pdf>

[66] Preferencia Europa

<https://newmobility.news/2018/10/24/eu-prefers-wifi-above-5g-for-connected-car-of-future/>

[67] Comunicación V2I

http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/jarmurendszerek_iranyitasa_angol/math-ch09.html

[68] Mensajes V2I e I2V

<https://www.indracompany.com/en/v2i-i2v-cooperative-systems>

[69] Comunicación entre vehículos

https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/documents/v2v_fact_sheet_1014_14_v2a.pdf

[70] Parag Sewalkar y Jochen Seitz (Enero 2019) Vehicle-to-Pedestrian Communication for Vulnerable Road Users: Survey, Design Considerations, and Challenges

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6359035/>

[71] Tarifas Movistar

<https://www.movistar.es/particulares/movil/tarifas-moviles/tarifas-contrato-tarjeta/?filter=contrato>

[72] Datos consumidos por Netflix

<https://www.whistleout.com.mx/CellPhones/Guides/cuantos-datos-consume-netflix>

[73] Stadia

<https://stadia.dev/>

[74] Consumo datos Stadia

https://as.com/meristation/2019/11/21/noticias/1574329082_575706.html

[75] José Antonio Sánchez Sánchez (2017). Redes Vehiculares Aplicadas a la Inteligente y Sostenibilidad Ambiental en Entornos de Ciudades Inteligentes.

http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/45013/1/TD_JoseAntonioSanchez.pdf

[76] Subasta Espectro 5G

<https://www.xatakamovil.com/mercado/vodafone-orange-movistar-se-reparten-espectro-subasta-para-5g-542-millones-euros>

[77] Eficiencia espectral 4G y 5G

<http://www.techplayon.com/spectral-efficiency-5g-nr-and-4g-lte/>

[78] Edward J. Oughton, Zoraida Frias, Sietse van der Gaast, Rudolf van der Berg. University of Oxford, UK (2019). Assessing the capacity, coverage and cost of 5G infrastructure strategies: Analysis of the Netherlands
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073658531830830X>

10. ANEXO

VVSSP-360S-F



10-port small cell antenna, 4x 1695–2690, 4x 3400–3800 and 2x 5150–5925 MHz. 360° Horizontal Beamwidth, fixed tilt.

Electrical Specifications

Frequency Band, MHz	1695–1920	1920–2180	2300–2690	3400–3800	5150–5925
Gain, dBi	6.6	7.3	8.2	4.9	5.1
Beamwidth, Horizontal, degrees	360	360	360	360	360
Beamwidth, Vertical, degrees	21.9	19.1	15.6	39.0	22.4
Beam Tilt, degrees	7	7	7	0	0
USLS (First Lobe), dB	14	14	12	19	9
Isolation, Cross Polarization, dB	25	25	25	25	25
Isolation, Inter-band, dB	28	28	28	28	28
VSWR Return Loss, dB	1.5 14.0	1.5 14.0	1.5 14.0	1.5 14.0	1.5 14.0
PIM, 3rd Order, 2 x 20 W, dBc	-153	-153	-150		
Input Power per Port, maximum, watts	125	125	125	35	5
Polarization	±45°	±45°	±45°	±45°	±45°
Impedance	50 ohm	50 ohm	50 ohm	50 ohm	50 ohm

Electrical Specifications, BASTA*

Frequency Band, MHz	1695–1920	1920–2180	2300–2690	3400–3800	5150–5925
Gain by all Beam Tilts, average, dBi	6.3	7.1	7.9	4.7	4.4
Gain by all Beam Tilts Tolerance, dB	±0.6	±0.5	±0.5	±0.3	±1.1
Beamwidth, Vertical Tolerance, degrees	±2	±2.3	±1.5	±5.7	±6.5

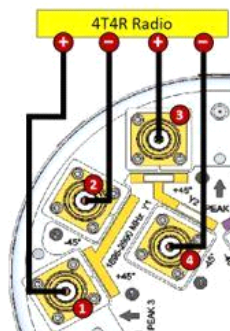
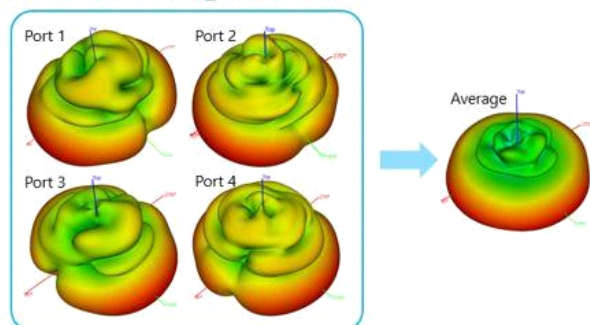
* CommScope® supports NGMN recommendations on Base Station Antenna Standards (BASTA). To learn more about the benefits of BASTA, [download the whitepaper Time to Raise the Bar on BSAs](#).

5 GHz Port Power Table

5 GHz FCC Power Requirements				
U-NII Band	U-NII 1	U-NII 2A	U-NII 2C	U-NII 3
Frequency (MHz)	5150 - 5250	5250 - 5350	5470 - 5725	5725 - 5850
Max Input power per port to align with FCC Title 47 Part 15 (Watts)	0.5	0.125	0.125	0.5

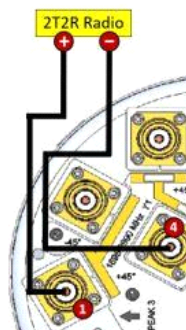
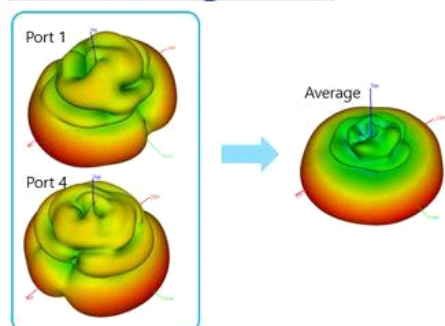
Port Configuration

4X Port Configuration:



- When using a 4T4R radio, use ports 1 – 4 of the pattern diversity antenna

2X Port Configuration:



- When using a 2T2R radio, use ports 1 & 4 of the pattern diversity antenna
- Using ports 2 & 3 yields the same result
- This ensures that both orientations and both polarizations are used
- When using this antenna in 2T2R, then this antenna does not have full polarization diversity

General Specifications

Operating Frequency Band	1695 – 2690 MHz 3400 – 3800 MHz 5150 – 5925 MHz
Antenna Type	Small Cell
Band	Multiband
Performance Note	Outdoor usage Wind loading figures are validated by wind tunnel measurements described in white paper WP-112534-EN
Total Input Power, maximum	300 W @ 50 °C

Mechanical Specifications

RF Connector Quantity, total	10
RF Connector Quantity, high band	10
RF Connector Interface	4.3-10 Female

VVSSP-360S-F

Grounding Type	RF connector inner conductor and body grounded to reflector and mounting bracket
Radiator Material	Low loss circuit board
Radome Material	Fiberglass, UV resistant
Reflector Material	Aluminum
RF Connector Location	Bottom
Wind Loading, frontal	58.0 N @ 150 km/h 131.7 lbf @ 150 km/h
Wind Loading, maximum	58.0 N @ 150 km/h 13.0 lbf @ 150 km/h
Wind Speed, maximum	241 km/h 150 mph

Dimensions

Length	600.0 mm 23.6 in
Outer Diameter	200.0 mm 7.9 in
Net Weight, without mounting kit	7.0 kg 15.4 lb

Packed Dimensions

Length	850.0 mm 33.5 in
Width	320.0 mm 12.6 in
Depth	300.0 mm 11.8 in
Shipping Weight	9.6 kg 21.2 lb

Regulatory Compliance/Certifications

Agency

RoHS 2011/65/EU

ISO 9001:2015

China RoHS SJ/T 11364-2014

Classification

Compliant by Exemption

Designed, manufactured and/or distributed under this quality management system

Above Maximum Concentration Value (MCV)



* Footnotes

Performance Note

Severe environmental conditions may degrade optimum performance